

Trabajo Fin de Máster

"ANÁLISIS MODAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y ENSAYOS EXPERIMENTALES DE UNA PLATAFORMA MULTI-REGISTRO PARA LA VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIR POR COORDENADAS PORTÁTILES"

Autor

Pascual Ibañez Deler

Director/es

Jorge Santolaria Mazo
Javier Óscar Abad Blasco

Universidad de Zaragoza/ Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
2014

Análisis modal mediante el Método de Elementos Finitos y ensayos experimentales de una plataforma multiregistro para la verificación de instrumentos de medir por coordenadas portátiles

Resumen

Este trabajo final de master surge de motivaciones e intereses en conocer y determinar el comportamiento de un sistema particular, desarrollado en el seno del departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación y con el cual se han desarrollado y se siguen desarrollando tesis doctorales.

Este ingenio pretende constituir un hito en los sistemas de medición rápida asegurando en todo momento una buena calidad en la medida.

Con el objeto de conocer los comportamientos del sistema de coordenadas portátiles durante su uso en laboratorio, surge la necesidad de conocer e investigar sus posibles comportamientos ante excitaciones frecuenciales que pudiesen aparecer en el uso del dispositivo, establecer esas frecuencias perjudiciales y las consecuencias que ellas originan en el conjunto. Generando un modelo teórico es posible dar una imagen rápida de posibles características e influencias y estudiar diferentes supuestos, casos extraños que fundasen interés, sin comprometer la integridad de la plataforma multiregistro.

El caso que aborda esta memoria se centra en la generación de un modelo que parametrize el comportamiento frecuencial del sistema mediante el Método de los Elementos Finitos y, gestionando tanto el cálculo como los resultados, utilizando ABAQUS. Para corroborar la adecuación del modelo es ineludible caracterizar el comportamiento real del sistema y es por ello la necesidad de establecer diferentes ensayos que fundamenten las correlaciones entre teoría y experimentalidad. Con estos diferentes ensayos, es factible realizar o no, la adecuación del modelo teórico planteado con el real, de aquí la razón fundamental del grueso de este trabajo.

El método Montecarlo, como método numérico estadístico usado para resolver problemas físicos mediante la simulación de variables aleatorias, permite la obtención de una matriz general donde extraer los parámetros de medida finales a partir de entradas de medidas aleatorias otorgadas por la plataforma multiregistro y sujeta a su configuración probabilística, distribución de probabilidad, media y desviación determinada.

A fecha de redacción y entrega de esta memoria, cabe destacar la confirmación de un modelo teórico apropiado, en término de formas modales, sujeto a las limitaciones de los equipos utilizados, añadiendo la generación de un método de Montecarlo en un sistema complejo, sujeto a grandes incertidumbres y variables a considerar; propiciando que esta memoria sea pie de avance en investigación y desarrollo para posteriores miembros investigadores.

<i>Índice</i>	<i>Página</i>
<i>Presentación</i>	<i>3</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>4</i>
<i>Justificación del TFM</i>	<i>5</i>
<i>Introducción</i>	<i>7</i>
<i>Capítulo 1: Simplificaciones previas al análisis modal</i>	<i>9</i>
<i>1.1 Justificación del diseño y sus simplificaciones para el análisis y estudio</i>	<i>9</i>
<i>1.2 Simplificaciones del modelo</i>	<i>9</i>
<i>1.2.1 Uniones atornilladas.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2.2 Simplificación de geometrías</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3 Eliminación de elementos de masa despreciable</i>	<i>11</i>
<i>1.3 Resultado global de las simplificaciones en el modelo final para cálculo</i>	<i>12</i>
<i>Capítulo 2. Análisis modal del modelo mediante ABAQUS</i>	<i>21</i>
<i>2.1 Importación y tratamiento del modelo</i>	<i>22</i>
<i>2.2 Resultados Análisis modal modelo libre</i>	<i>25</i>
<i>2.3 Resultados Análisis modal modelo apoyo en mesa (apoyo real)</i>	<i>29</i>
<i>2.4 Conclusiones al análisis computacional</i>	<i>33</i>
<i>Capítulo 3. Análisis modal experimental del modelo</i>	<i>35</i>
<i>3.1 Secuencia del ensayo.....</i>	<i>35</i>
<i>3.2 Realización del ensayo y obtención de modos de vibración y frecuencias naturales.....</i>	<i>40</i>
<i>3.3 Conclusiones al ensayo experimental.....</i>	<i>44</i>
<i>Capítulo 4. Montecarlo.....</i>	<i>47</i>
<i>4.1 Fases del proceso de estimación de la incertidumbre de medida</i>	<i>47</i>
<i>4.2 Ejecución del modelo Monte Carlo mediante parámetros de medida experimentales para el modelo en cuestión.....</i>	<i>48</i>
<i>4.3 Resultados obtenidos en Montecarlo para un caso general</i>	<i>54</i>
<i>4.4 Conclusiones a los resultados de la simulación de Montecarlo</i>	<i>57</i>
<i>Conclusiones generales al Proyecto</i>	<i>59</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>61</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>64</i>
<i>Anexo I. Comandos utilizados en MATLAB para la obtención de MONTECARLO.....</i>	<i>64</i>
<i>Anexo II. Cálculo de Fourier mediante MATLAB.....</i>	<i>66</i>

Presentación

En esta memoria se plasma el trabajo desarrollado por Pascual Ibañez Deler para el desarrollo del Trabajo Final del Master Universitario de Sistemas Mecánicos de la Universidad de Zaragoza.

Este texto, de carácter técnico, pretende plasmar los aspectos más relevantes del trabajo, experiencias, imágenes del proceso, problemas, adopción de soluciones; todo aquello que ha comportado la consecución de los objetivos marcados.

El título del Trabajo Final del Master resume lo que se desarrolla en el cuerpo de esta memoria.

***“ANÁLISIS MODAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
Y ENSAYOS EXPERIMENTALES DE UNA PLATAFORMA MULTI-REGISTRO
PARA LA VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIR POR
COORDENADAS PORTÁTILES”***

Agradecimientos

A mi familia, mi pareja y allegados.

Justificación del TFM

Actualmente existe una demanda en alza en tareas de medición rápida y fiable para el control, asegurando en todo momento una buena calidad de los sistemas modernos para producción y planteando retos en las áreas de la metrología dimensional.

Una clase importante de sistemas de medición es la integrada por los instrumentos de medición de coordenadas portátiles. En este momento, estos sistemas presentan algunas desventajas asociadas a las técnicas aplicadas en sus procedimientos de verificación y optimización de parámetros, basándose en la captura con elementos de medida de datos de un objeto patrón calibrado, dispuesto sucesivamente en varias posiciones dentro del rango del alcance de medida del equipo, con el fin de cubrir gran parte de su espacio de trabajo disponible. Estas variaciones de posicionamiento del objeto patrón, hace que el procedimiento de verificación sea un proceso costoso en duración.

A partir del diseño, fabricación y calibración de una plataforma multi-registro desarrollada dentro del área de fabricación de la Universidad de Zaragoza, para mejorar y simplificar los procedimientos de verificación en instrumentos de medición por coordenadas portátiles, recae el desarrollo de este Trabajo Fin de Máster de Sistemas Mecánicos.

En el estado de desarrollo del prototipo actual resulta de interés realizar una serie de ensayos y caracterizaciones del funcionamiento del sistema completo, sometiéndolo a excitaciones reales que sucederían durante su uso. Es este el objetivo del trabajo, conocer el comportamiento del sistema en sus posibles usos a través de análisis modales y captación de las frecuencias naturales y, la influencias de las excitaciones ajenas al sistema que pudiesen influir en la medida exacta de los dispositivos de captación, para su posterior análisis y estudio de dichas influencias durante el procedimiento de medida.

La aplicación del método Montecarlo sobre el sistema permitirá caracterizar los parámetros que se obtienen durante su uso, determinando una medida ajustada a una distribución de posibles medidas y rangos del valor de medida dentro de ciertos intervalos de confianza, incluso del 99%.

Introducción

Por lo general, los equipos portátiles, tales como los brazos articulados de medición por coordenadas o láser trackers basados en las técnicas de procedimientos de verificación y optimización de parámetros, donde se procede a la captura de datos de medida en un objeto patrón calibrado dispuestos en varias posiciones dentro del volumen de medida del equipo, plantean algunas desventajas en su uso, provocando que estos cambios de posición del patrón alrededor del instrumento de medida hagan del procedimiento una labor tediosa y de excesiva duración.

Para poder comenzar con los cálculos, es necesario establecer diferentes simplificaciones que faciliten el trabajo del ingeniero y reduzcan, sustancialmente, la complejidad estructural del sistema global y, a su vez, no discrepar del comportamiento real del mismo. Con estas simplificaciones se conseguirá un modelo simple y fiel a la realidad, que permitirá verificar su comportamiento en cálculos computacionales y su correspondencia con el modelo real en ensayos experimentales. Modelo que permitirá, con posterioridad, realizar estos y otros cálculos que pudiesen resultar de interés en ulteriores líneas de investigación.

El objeto de generar un modelo computacional ya ha sido descrito en el párrafo anterior y su obtención se basa, principalmente, en las modificaciones pertinentes mediante software de diseño específicos. Para este proyecto se utilizará SolidWorks13, donde se aplicarán las herramientas necesarias que permitan la obtención de tales simplificaciones. Para la gestión del modelo simplificado y los análisis computacionales se utilizará el programa ABAQUS donde se procederá a determinar el mallado oportuno para el modelo en relación al tamaño de geometría, al número de elementos necesarios y a la precisión del cálculo; se determinarán condiciones de contorno, necesarias para utilizar el Método de los Elementos Finitos, y se determinará el cálculo exacto de interés para este trabajo, un análisis modal. Obteniendo como resultado una serie de frecuencias naturales y unos modos de vibración del modelo computacional, que permitirán vislumbrar el comportamiento supuesto real del modelo en análisis y, tras la comprobación experimental, se determinará su adecuación o la necesidad de modificaciones para ser fidelizado al sistema real.

Por último, se ha demostrado a lo largo de los últimos años que se dispone de herramientas de simulación adecuadas que implementen las incertidumbres vía propagación de distribuciones, resultando una manera sencilla y eficaz. En el caso de problemas no lineales, o con distribuciones con grandes asimetrías, utilizar el Método de Monte-Carlo permite resolverlos de manera más sencilla que aplicando otros métodos existentes. Este método nos permite resolver problemas del tipo:

- Dada una función modelo con no linealidad significativa o una función no derivable
- Magnitud de medida con distribuciones muy asimétricas.
- Contribuciones dominantes difícilmente aproximables a una normal o w-student.

Capítulo 1: Simplificaciones previas al análisis modal

1.1 Justificación del diseño y sus simplificaciones para el análisis y estudio

Dada la complejidad y el número de elementos que componen la totalidad del sistema es necesario abordarlo desde un punto de vista mucho más simplificado con el objetivo de obtener un modelo análogo más simple en número de elementos, que permita visualizar, de manera cualitativa, el comportamiento de la estructura en los sucesivos ensayos computacionales que sean necesarios realizar.

La obtención de este modelo elemental permitirá reducir y simplificar los cálculos y costes computacionales asociados a los análisis.

Los software utilizados para la resolución de los casos de estudios basan su proceso de cálculo en el Método de los Elementos Finitos (MEF) y su aplicación en el teorema de los trabajos virtuales, de manera que la reducción o simplificación de geometrías y componentes permitirá reducir el número de unidades de proceso y seleccionar MEF's elementales, generando drásticas disminuciones del número de operaciones computacionales.

Para la simplificación del modelo se utilizarán una serie de criterios que permitan reducir la complejidad. Criterios de simplificación donde se omitan elementos sin requerimientos técnicos específicos, supresión de masas despreciables en comparación con el global del sistema, o elementos no rigidizadores del comportamiento global de la estructura.

1.2 Simplificaciones del modelo

1.2.1 Uniones atornilladas

Para comprender esta simplificación es necesario establecer las consideraciones de las uniones atornilladas como uniones soldables o no, dependiendo del tipo de unión roscada, en las cuales se unen dos o varias piezas sueltas a través de elementos de unión estandarizados, tornillos y tuercas.

Las uniones atornilladas se elaboran con el fin de mantener en la posición deseada las piezas que se van a unir, creando fuerzas necesarias para esta unión y manteniendo la misma posición durante el tiempo necesario, a su vez, transmitiendo movimientos y fuerzas de piezas constructivas. Por ello, una simplificación de acuerdo con unas

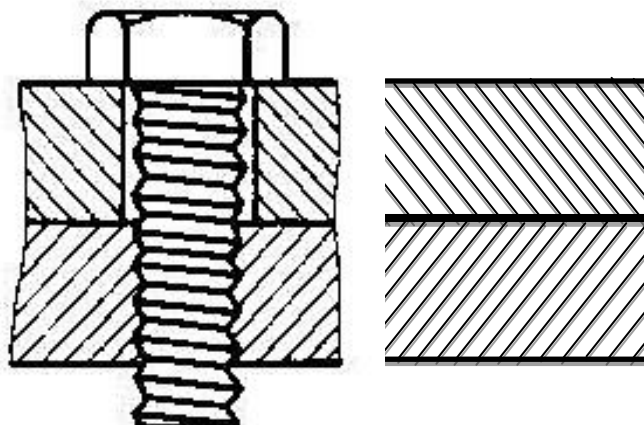


Imagen 1.simplificación uniones atornilladas

exigencias similares, son las uniones soldadas donde la unión de las piezas es solidaria de modo que se mantiene la posición deseada entre las piezas y se genera una unión que permite la transmisión de solicitaciones requeridas. Por tanto, las uniones atornilladas serán sustituidas por uniones entre elementos soldadas, suponiendo sin cordón de soldadura que modifique la rigidez de la unión.

Un ejemplo ilustrativo, en la imagen 2, de elementos atornillados simplificados por uniones rígidas en los asientos, donde se eliminan los orificios de alojamiento para los elementos roscado y simplificaciones de las geometrías, eliminando aspectos no relevantes para su uso en el cálculo posterior.

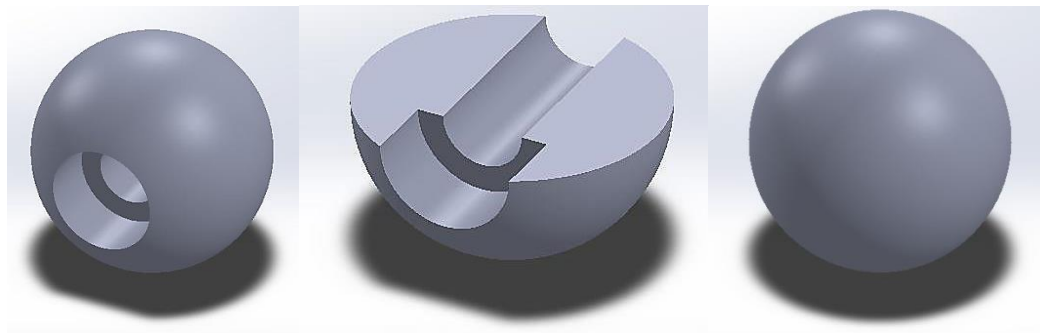


Imagen 2. Ejemplo1 simplificación esfera posicionamiento

1.2.2 Simplificación de geometrías

El diseño planteado posee una serie de geometrías enrevesadas para el mallado y el cálculo por el método MEF, de esta manera, reduciendo estas geometrías a meros cuerpos base geométricos mucho más simples, somos capaces de reducir la complejidad geométrica del modelo.

En elementos que realmente deben considerarse en las simulaciones de resultados y que por consiguiente no pueden ser obviados, es necesario seguir cierto patrón o criterio durante las simplificaciones.

Destacando la prioridad de las simplificaciones:

1. Respetar la geometría base en elementos comerciales
2. Eliminar orificios de roscado, bajo la consideración del apartado anterior
3. Reducir elementos no comerciales a geometrías base
4. Eliminar rebajes, resaltes u operaciones sobre elementos que generen complicaciones de cálculo o problemas de acomodo de elementos en el archivo para exportación, mallado y asignación CAD.

En elementos comerciales, como soportes y sensores utilizados, un ejemplo de la evolución de las simplificaciones puede verse en las siguientes imágenes.

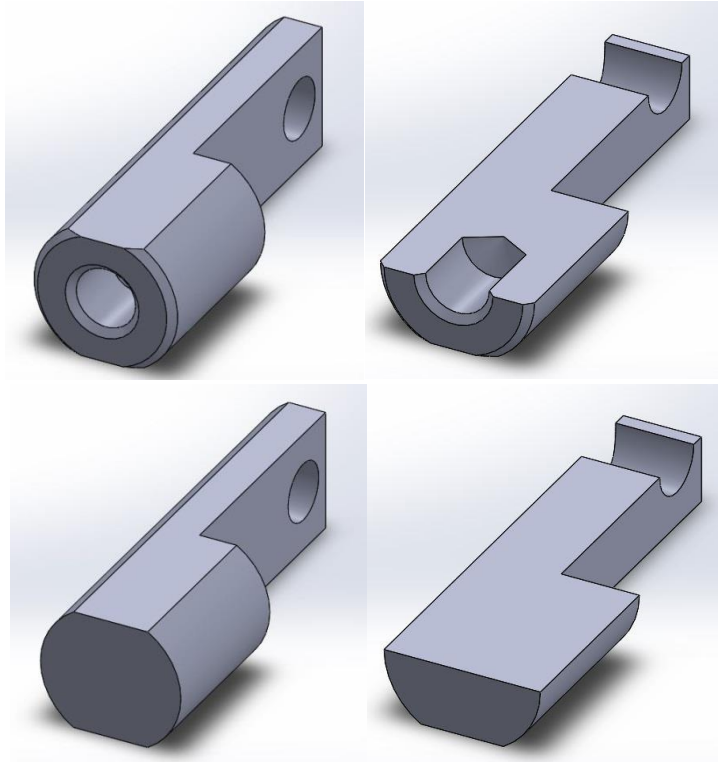


Imagen 3. Ejemplo proceso simplificación soporte sensor horizontal

Un ejemplo concreto de la rutina de simplificación utilizada se puede observar en las imágenes anteriores, donde se refleja el procedimiento de simplificaciones sucesivas. En este elemento concreto se eliminan chaflanes, taladros y posibles orificios sin repercusiones técnicas, es decir, sin generar posibles concentradores de tensión o disminuciones de las propiedades en alguno de los ejes principales del cuerpo singular. Obteniendo, finalmente, un elemento más próximo a un cuerpo simple de geometría más fácilmente mallable y que genera menos coste computacional finalmente.

1.2.3 Eliminación de elementos de masa despreciable

La existencia de elementos reducidos de masas no significativos en el conjunto total permite ser eliminados de las consideraciones, sin involucrar sustancialmente los resultados globales reales del modelo. De esta forma, pequeños elementos de unión, alimentadores, clip, racores, manguitos o casquillos de reducidas dimensiones quedan omitidos de los ensamblajes globales de simulación.

Como ejemplo, la eliminación de casquillos de guiado, elemento de material de menor densidad y reducidas dimensiones que, en términos de cálculo FEM, no aportan gran relevancia, y pueden ser suprimidos o considerados partes anexionadas del conjunto total, reduciendo el número global de elementos.

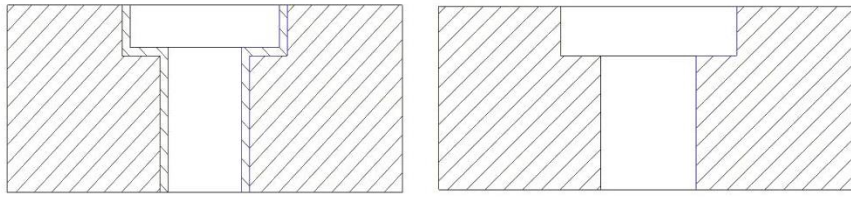


Imagen 4. Simplificación de casquillo por eliminación del cuerpo

1.3 Resultado global de las simplificaciones en el modelo final para cálculo

A partir del modelo total, en este apartado de la memoria se dispondrá a visualizar todas las simplificaciones realizadas para obtener un modelo básico de cálculo. Inicialmente, se dispone de un modelo CAD general como el que se puede apreciar en las imágenes, compuesto por la propia plataforma más el brazo articulado de medida.

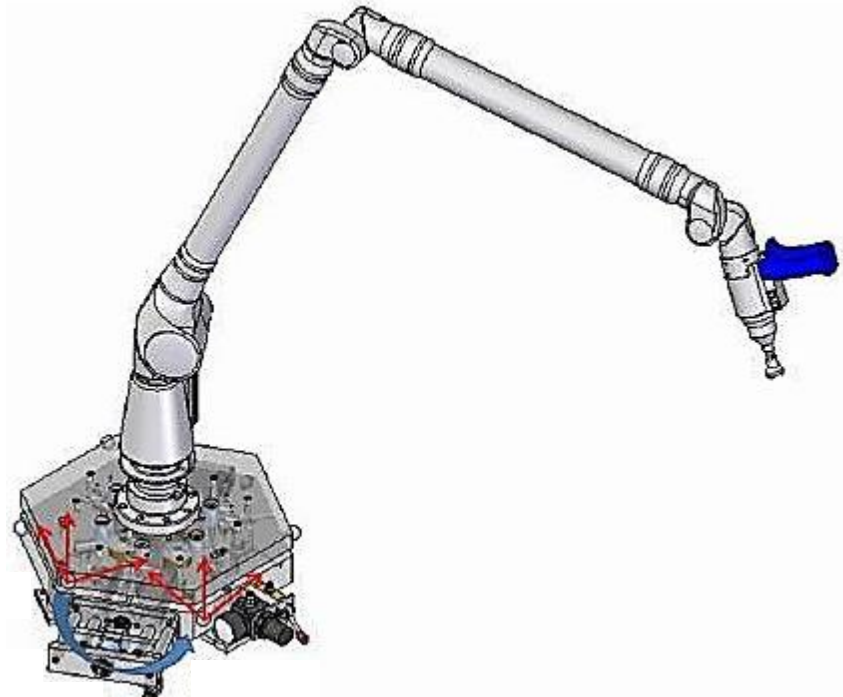


Imagen 5. Modelo CAD completo, Plataforma + Brazo de medida

Eliminando de las consideraciones de cálculo el brazo de medida, dado que su repercusión en el comportamiento real es despreciable en relación a la masa total del conjunto y, su aporte únicamente radica en una mayor rigidización del sistema y un posible desplazamiento del rango de frecuencias naturales totales, se obtiene el modelo de la imagen, compuesto por una serie de elementos que son numerados a continuación.

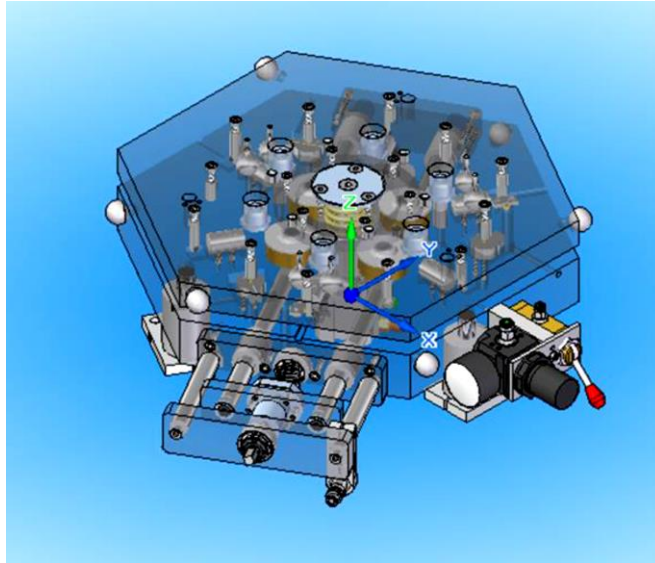


Imagen 6. Modelo CAD completo sin brazo de medida

La placa fija o base consta de los siguientes componentes mecánicos que se muestran en la imagen, asociados a la siguiente numeración:

1. Sensores capacitivos horizontales con sus soportes.
2. Sensores capacitivos verticales con sus soportes.
3. Cilindros de acoplamientos cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud.
4. Pasadores de registro.
5. Rodamientos esféricos.
6. Rodamiento axial a bolas.
7. Rodamientos lineales.
8. Barras para desplazamiento lineal.
9. Husillo a bolas.
10. Sistema neumático para generar precarga.
11. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa fija de 20 mm de diámetro.
12. Esferas de elevación de placa móvil de 16 mm de diámetro.
13. Postizos centrales para evitar rozamiento.
14. Patas para amarre de la placa fija.

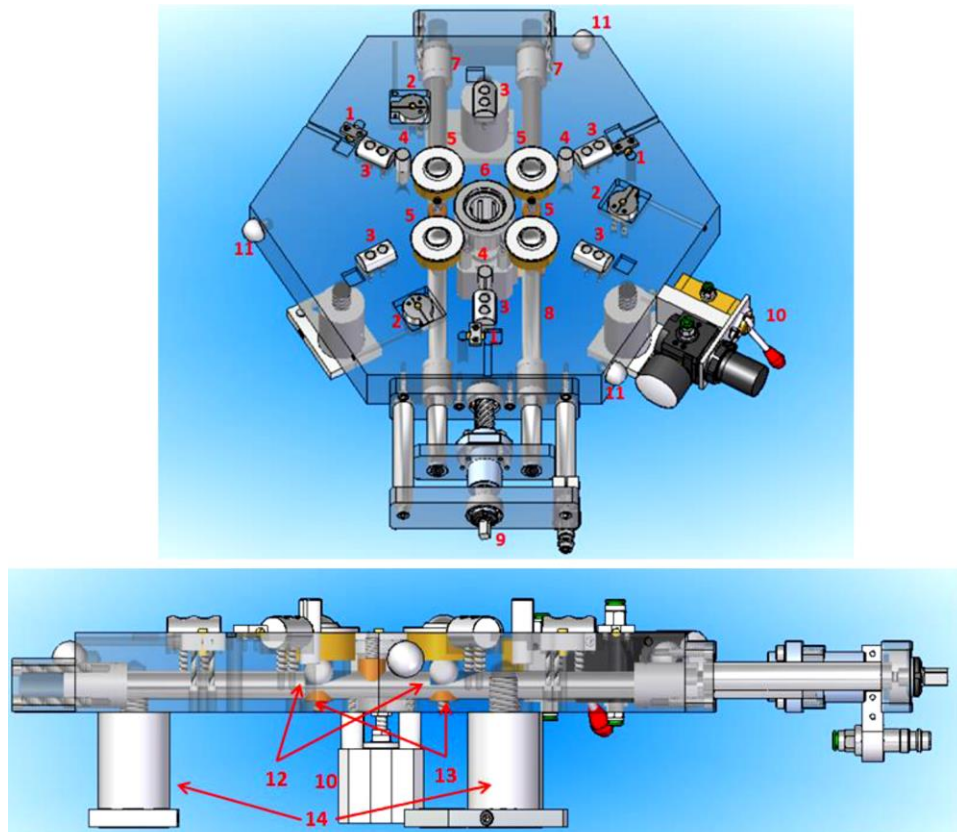


Imagen 7. Componentes mecánicos de placa fija global

Haciendo uso de las consideraciones de simplificación mencionadas se obtiene un modelo de base o placa fija con un número más reducido de elementos. Donde se mantienen posicionados los siguientes elementos:

1. Sensores capacitivos horizontales con sus soportes.

Se mantienen en el modelo simplificado para visualizar su comportamiento simulado en los análisis a desarrollar, aplicando únicamente las consideraciones en las cuales se respeta la geometría base del elemento comercial, eliminar rebajes, resaltes u operaciones sobre elementos que generen complicaciones de cálculo o problemas de acomodo de elementos en el archivo para exportación, mallado y asignación CAD.

2. Sensores capacitivos verticales con sus soportes.

Criterios análogos al caso anterior.

3. Cilindros de acoplamientos cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud.

Son eliminados los orificios de atornillado, considerados solidarios y como uniones rígidas a la base de la plataforma

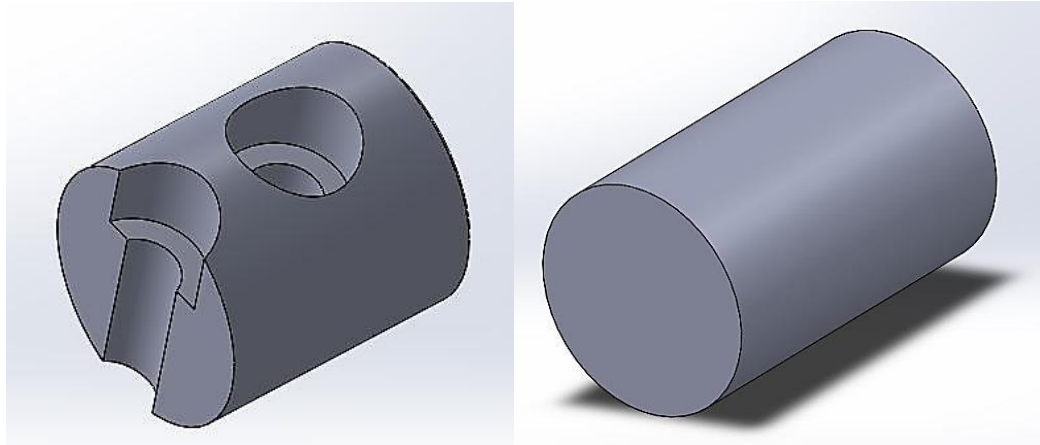


Imagen 8. Simplificación de cilindro de acoplamiento

4. Pasadores de registro.

Estos elementos garantizan el correcto posicionamiento final del sistema una vez desplazado sobre su eje, sus requerimientos técnicos son nulos o escasos y pueden ser obviados en los primeros análisis, podría resultar interesante incluirlos en posteriores análisis, pero su coste computacional aumenta por geometría y número de elementos

5/6/7 Rodamientos esféricos, axiales de bolas y lineales.

Son eliminados del modelo simplificado debido a que, idealmente, carecen de requerimientos o exigencias mecánicas para los análisis a realizar.

8. Barras para desplazamiento lineal.

Serán eliminados de las simplificaciones por su aporte en términos de rigidez en el sistema. De esta forma, se podrá realizar un análisis algo más desfavorable del modelo real.

9. Husillo a bolas.

Eliminado por no suponer un elemento que, en el conjunto simplificado, modifique la estructura base.

10. Sistema neumático para generar precarga.

Obviado para los cálculos, para el caso de análisis sin precarga, por ser un elemento externo a la estructura elemental del sistema.

11. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa fija de 20 mm de diámetro.

Masas despreciables y externas a la estructura, son obviadas para cálculos.

12. Esferas de elevación de placa móvil de 16 mm de diámetro.

Sistema de elevación eliminado para los primeros análisis, pudiéndose considerar para posteriores análisis de sensibilidad de los cálculos y observar su influencia en la rigidez conjunta del sistema, por simplicidad se eliminan de los primeros ensayos computacionales.

13. Postizos centrales para evitar rozamiento.

Elemento de masa despreciable, solidario a la estructura, puede ser eliminado de las consideraciones.

14. Patas para amarre de la placa fija.

Simplificadas a cilindros solidarios a la superficie inferior de la placa base, en condiciones de contorno serán considerados igualmente empotrado al suelo.

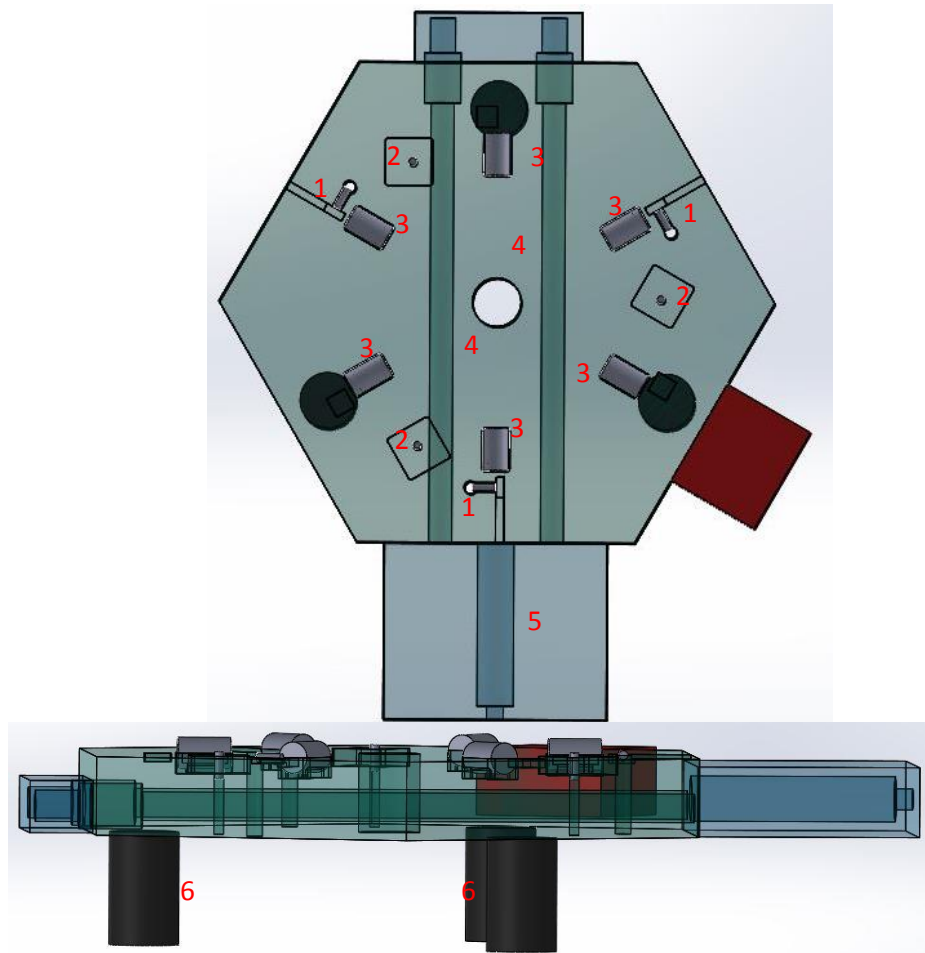


Imagen 9. Componentes mecánicos y geometría final de placa fija simplificada

En este caso, el conjunto queda reducido:

1. Sensores capacitivos horizontales sin sus soportes.

2. Sensores capacitivos verticales sin sus soportes.
3. Cilindros de acoplamientos cinemáticos de 18 mm de diámetro y 30 mm de longitud
4. Barras para desplazamiento lineal.
5. Husillo a bolas.
6. Patas para amarre de la placa fija.

La placa móvil global consta de los siguientes componentes que se muestran en la imagen asociados a la siguiente numeración:

1. Targets de sensores capacitivos horizontales.
2. Targets de sensores capacitivos verticales.
3. Par de esferas de los acoplamientos cinemáticos de 20 mm de diámetro cada esfera.
4. Casquillos para pasadores de registro.
5. Anillo de rodadura.
6. Eje.
7. Muelle de precarga.
8. Esferas de caracterización de sistema de coordenadas de placa móvil de 20 mm de diámetro.

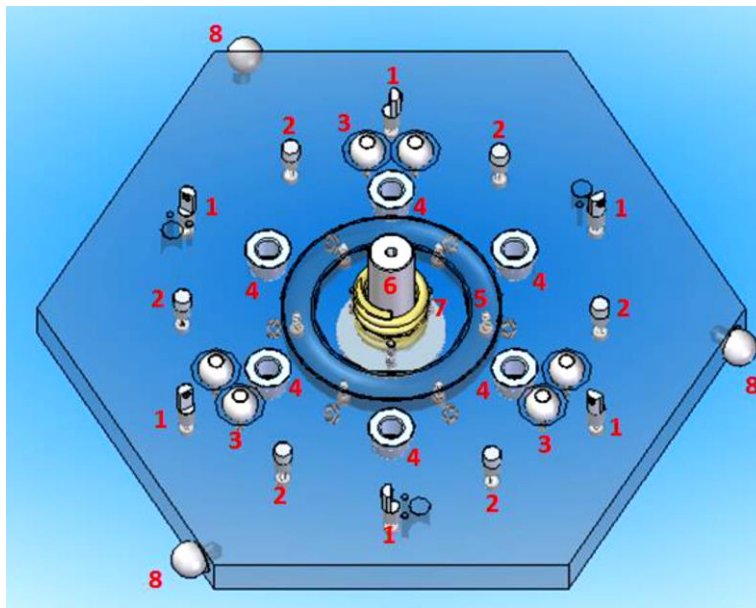


Imagen 10. Componentes mecánicos de placa móvil

Aplicando los criterios de simplificaciones, de manera semejante al caso de la simplificación de la base fija, se obtiene un modelo más simple de elementos con geometrías elementales y con uniones semejantes al modelo real.

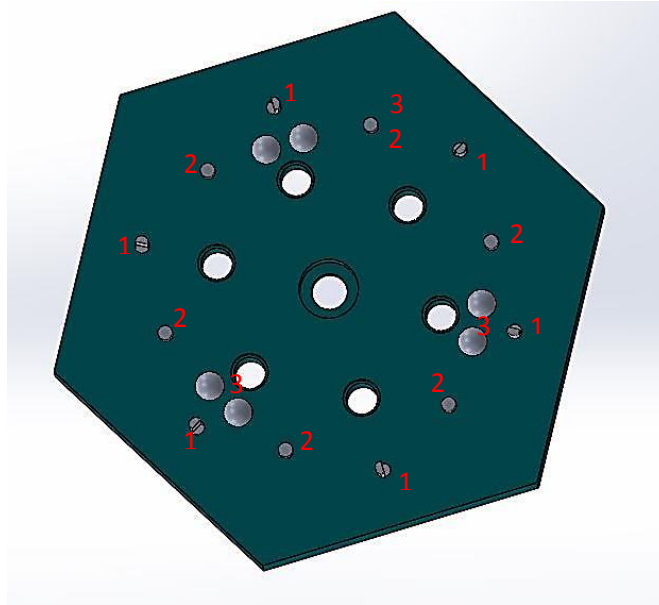


Imagen 11. Componentes mecánicos y geometría final de placa móvil simplificada

Reduciendo el número de elementos para introducir en los ensayos computacionales a los siguientes:

1. Targets de sensores capacitivos horizontales.
2. Targets de sensores capacitivos verticales.
3. Par de esferas de los acoplamientos cinemáticos de 20 mm de diámetro cada esfera.

De aplicar las simplificaciones se obtiene un modelo de ensamblaje simplificado.

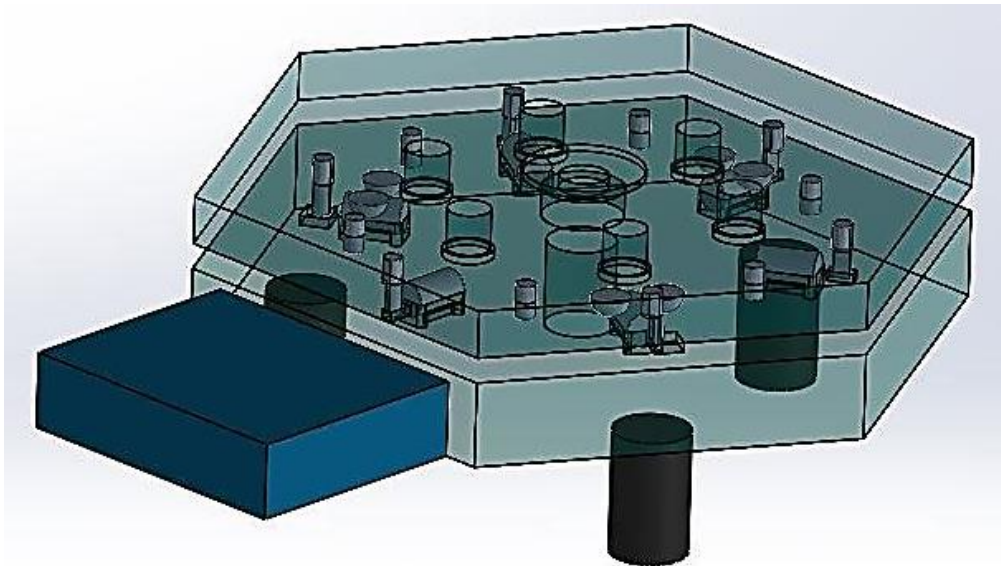


Imagen 12. Simplificación final para el posterior análisis mediante ABAQUS

Resumiendo, las simplificaciones dan lugar a un modelo más simple y similar en propiedades del real. El modelo reducido disminuye el número de elementos que lo componen

y, simplificar su geometría permite una sustancial reducción del coste computacional en los posteriores cálculos a realizar mediante los software específicos.

Desde el punto de vista de trabajo con el modelo reducido, este permite un proceso más ligero y menos laborioso a la hora del lanzamiento de los cálculos necesarios.

De esta forma, el coste computacional, medido en horas de cálculo, tratamiento de datos y resultados, preparación de los casos de análisis, queda disminuido significativamente en comparación con el uso de un modelo compuesto íntegramente y sin simplificaciones.

Concluyendo, a mayor complejidad del sistema, mayor número de elementos y geometrías complejas, los costes asociados posteriormente son directamente proporcionales.

Capítulo 2. Análisis modal del modelo mediante ABAQUS

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales, muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos aportando una solución numérica aproximada sobre un cuerpo. La estructura se divide en un número elevado de “elementos finitos”, dentro de cada uno de estos elementos se distinguen una serie de puntos representativos llamados “nodo” y un conjunto de estos generan una malla.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo que hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

Las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- Pre-proceso, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, condiciones de contorno y propiedades de los materiales.
- Cálculo, resolución de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo, a veces, el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- Post-proceso, se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos y, en ocasiones, se aplican operaciones de suavizado de mallas, interpolación de errores de aproximación.

Realizar un análisis modal mediante el método de los elementos finitos permite obtener, de manera rápida y con reducida inversión, un modelo de cálculo que suministre diferentes parámetros del elemento a analizar.

En estos análisis se obtendrán parámetros como:

- Frecuencias naturales
- Formas modales

2.1 Importación y tratamiento del modelo

Para la realización de cálculos mediante ABAQUS es necesario importar las geometrías simplificadas con el objeto de comenzar el análisis. Los formatos admitidos por el software son .x_t, .igs, .sat,...

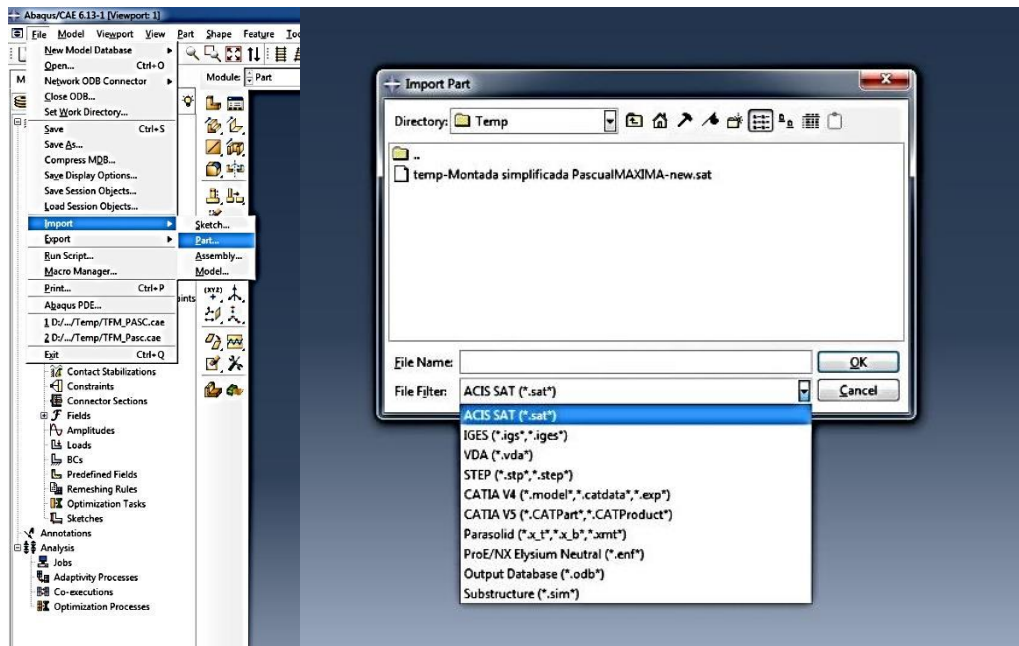


Imagen 13. Importación de modelos para análisis modal

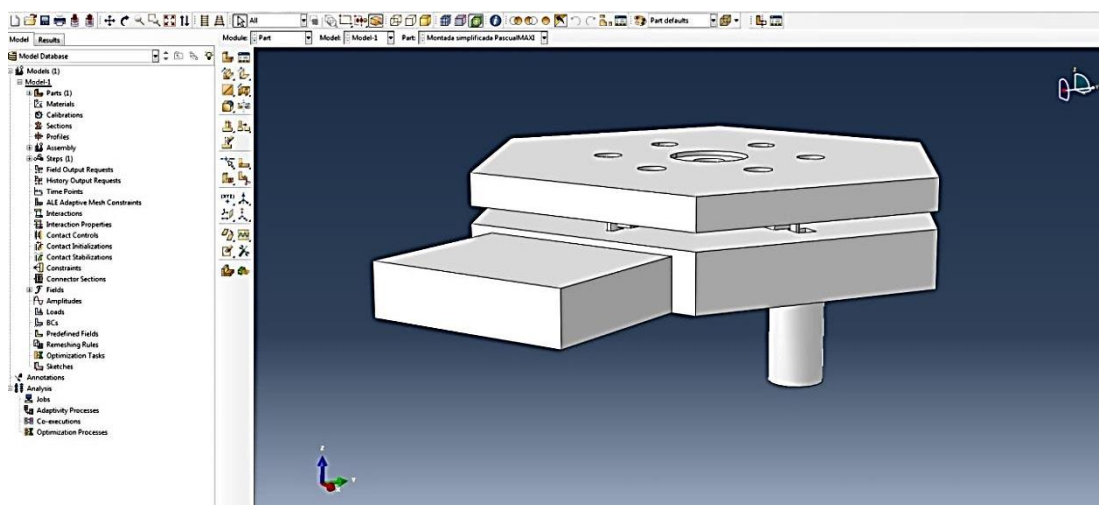


Imagen 14. Modelo importado

Es necesario definir los materiales del modelo, su uso específico y la idoneidad del mismo, estos son:

- F 131 / F 1310 100 C 6 100Cr6 52100, cuyo uso específico y recomendado es para rodamientos y cojinetes de todas las dimensiones, anillos y discos con un espesor de pared de hasta 30 mm. Utilizado para la construcción de las esferas de apoyo y registro de la placa superior.
- F115 / F 1150 XC 55H1 Ck 55 1055 Bonificado HRC54 Para piezas que deben poseer una resistencia de 700 a 900 N/mm². Utilizado para la construcción de los cilindros de apoyo y eje central acero.
- F 114 / F 1140 XC 45/XC 48 Ck 45 1045 Acero al carbono de uso general, para piezas con una resistencia media (650-800 N/mm²) en estado bonificado, apto para el temple superficial. Utilizado para la construcción de las plataformas superior e inferior.
- F111 / F 1 E 24 RSt 37-2 A 570 Gr 36 Acero de base no aleado de uso general. Admite la soldadura. Utilizado para la construcción del resto de pletinas de elevación y elementos restantes del modelo.

Todos estos materiales son aceros de tratamiento térmico determinado para cada requerimiento específico, poseen en común las propiedades necesarias para el cálculo de frecuencias y modos de vibración, densidad, módulo de Young y coeficiente de Poisson.

Densidad=7.800kg/m³

Modulo= 210.000 MPa

Coeficiente de Poisson= 0.33

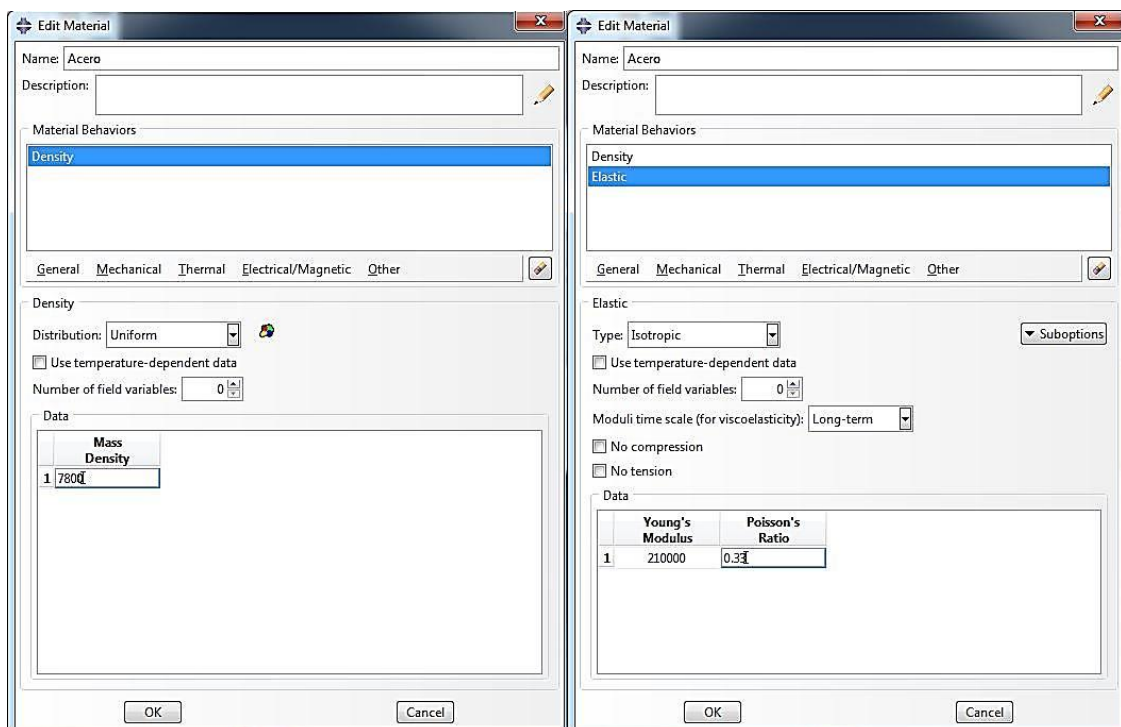


Imagen 15. Inserción de materiales en ABAQUS

Dado el modelo tridimensional se procede a un mallado mediante elementos tetraédricos ajustados a curvatura. La creación de dicha malla genera un total de 260.000 elementos aproximadamente.

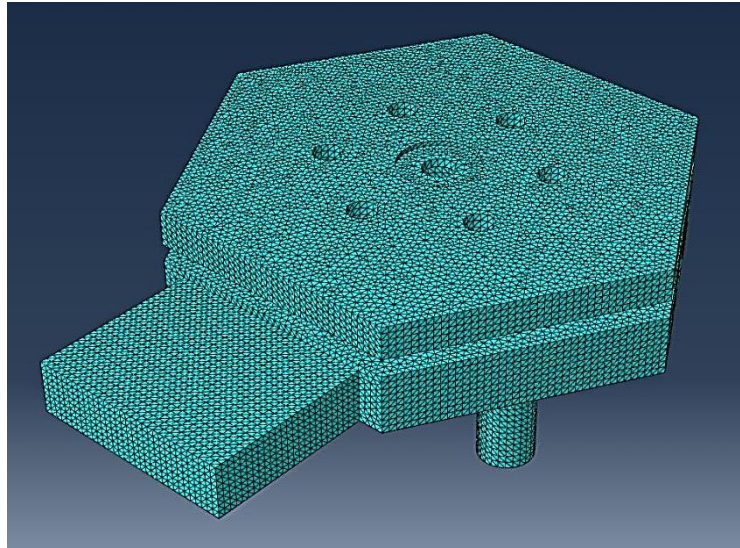


Imagen 16. Mallado resultante

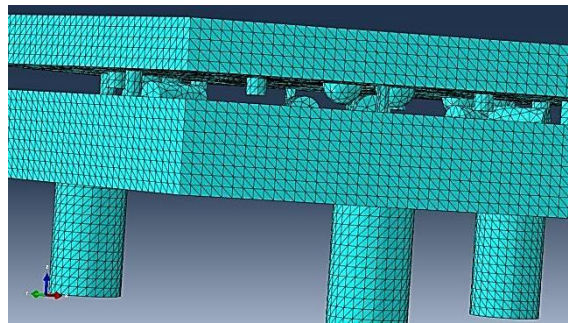


Imagen 17. Detalle mallado elementos de posicionamiento

Una vez obtenido un modelo definido y mallado, es necesario determinar el modo de sustentación de la estructura. La determinación de este modo permitirá obtener los comportamientos más real y ajustado al comportamiento real del modelo. Típicamente se puede optar por ensayos de tipo:

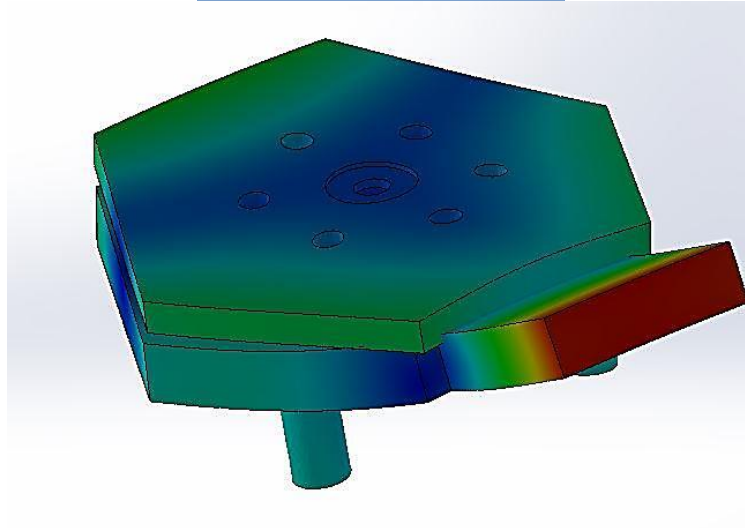
- Condiciones de apoyo reales: Si es posible las condiciones de apoyo del modelo deberán ser lo más similares a las condiciones reales del modelo en operación.
- Ensayo libre-libre (modelo suspendido): Realizar este ensayo permite simular otras posibles condiciones de apoyo, incluso la unión del modelo a otros componentes estructurales.

Estos análisis, permiten obtener los modos de vibración como sólido rígido a frecuencias más bajas que los posibles modos de vibración con deformación de la estructura; estos últimos de interés para el análisis a realizar, ya que pueden influir en el comportamiento de la medida del modelo durante su uso.

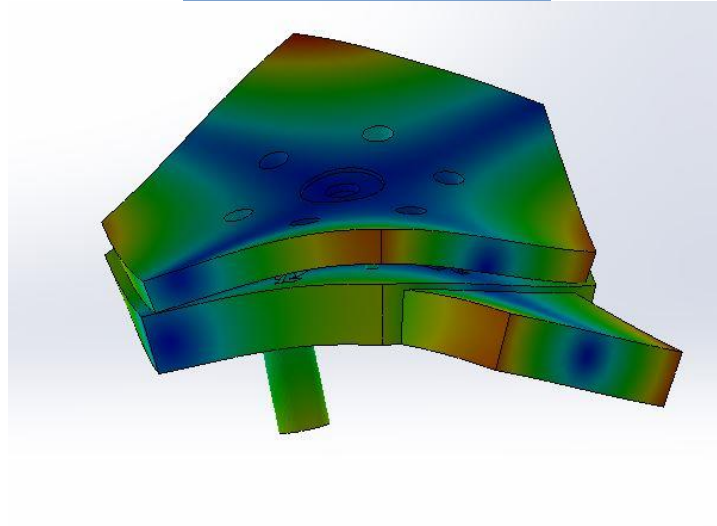
2.2 Resultados Análisis modal modelo libre

Como ya se ha mencionado el desarrollo de este cálculo parte de la suposición de un modelo ideal suspendido, sin interacciones con el medio, permitiendo obtener los modos de vibración y sus frecuencias naturales.

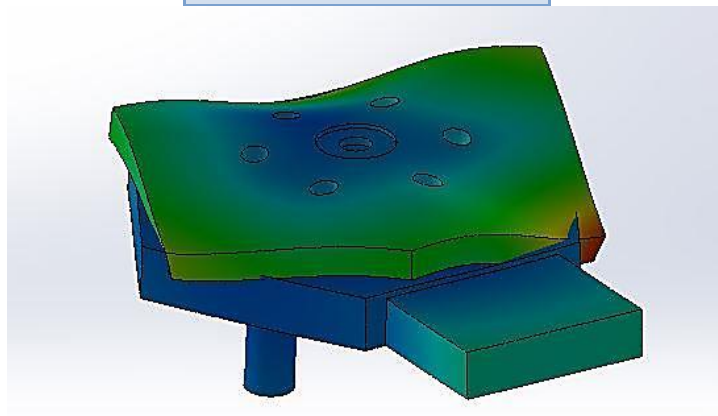
Nombre	Frecuencia
Modo 1	1.01583e+006 Hz



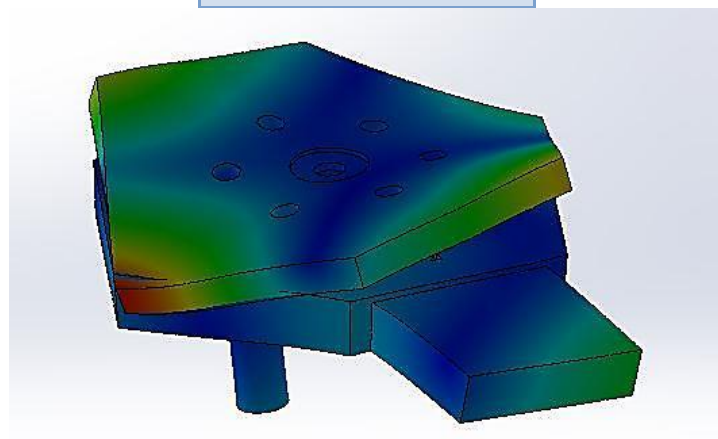
Nombre	Frecuencia
Modo 2	1.50217e+006 Hz



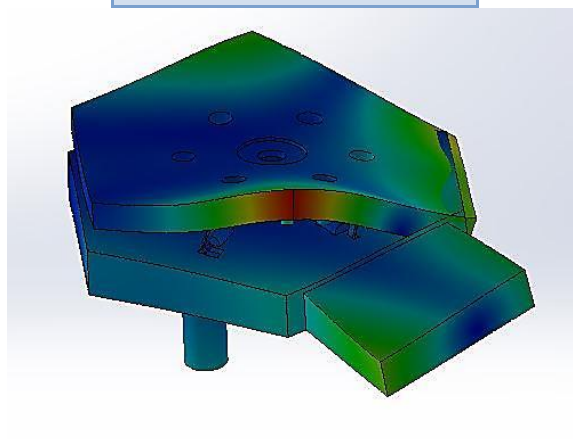
Nombre	Frecuencia
Modo 3	1.69175e+006 Hz



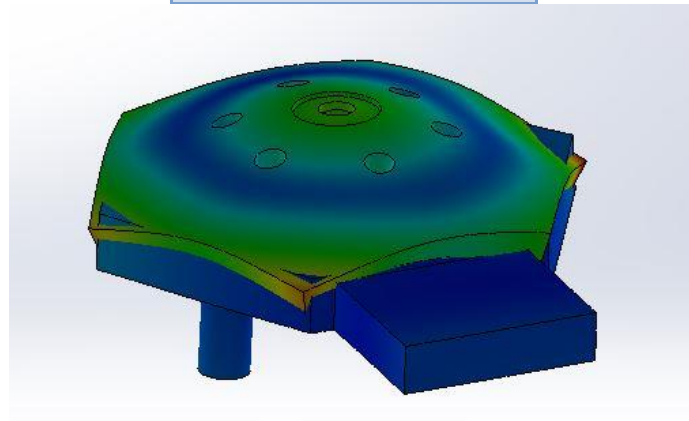
Nombre	Frecuencia
Modo 4	1.748e+006 Hz



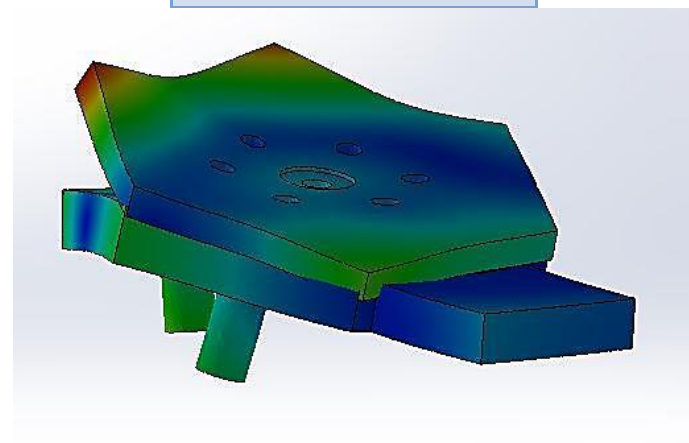
Nombre	Frecuencia
Modo 5	1.79022e+006 Hz



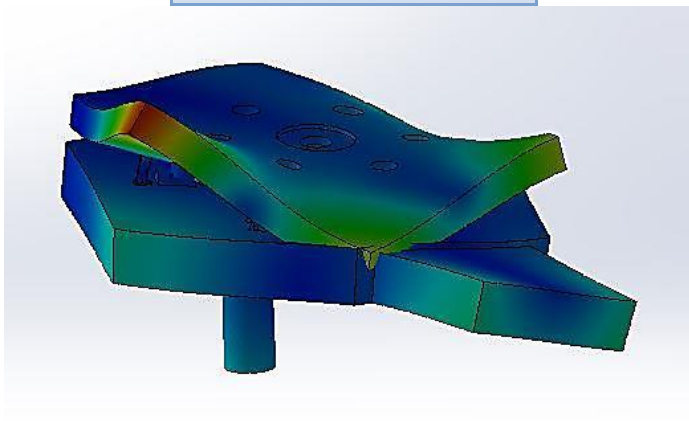
Nombre	Frecuencia
Modo 6	1.91663e+006 Hz



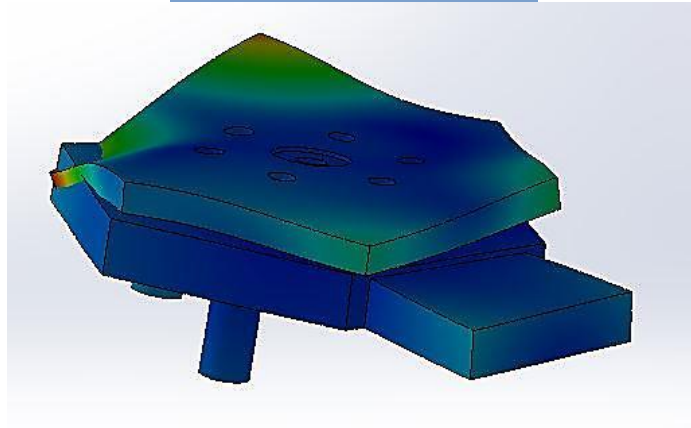
Nombre	Frecuencia
Modo 7	1.97322e+006 Hz



Nombre	Frecuencia
Modo 8	2.30532e+006 Hz



Nombre	Frecuencia
Modo 9	2.35955e+006 Hz



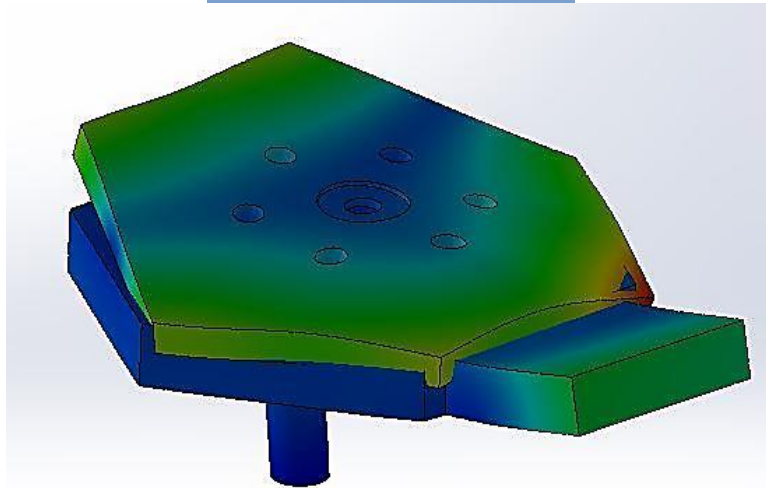
Lista resumen de modos

Número de frecuencias	Rad/seg	Hertz
1	6.3827e+006	1.0158e+006
2	9.4384e+006	1.5022e+006
3	1.0630e+007	1.6918e+006
4	1.0983e+007	1.748e+006
5	1.1248e+007	1.7902e+006
6	1.2043e+007	1.9166e+006
7	1.2398e+007	1.9732e+006
8	1.4485e+007	2.3053e+006
9	1.4826e+007	2.3596e+006

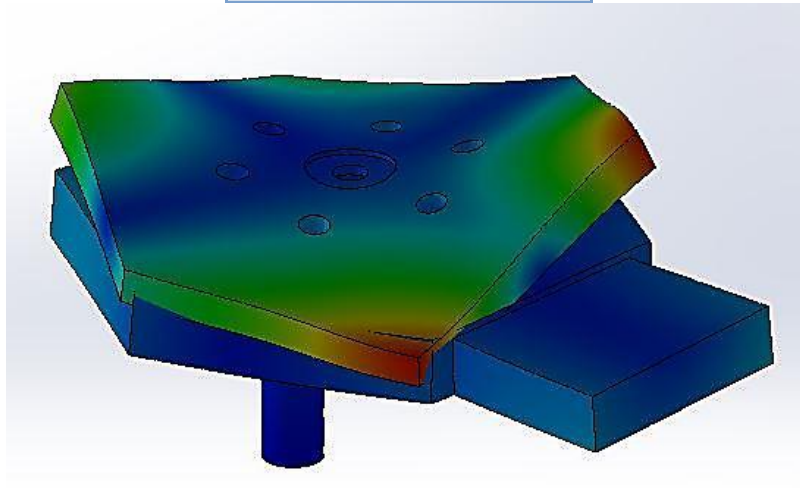
2.3 Resultados Análisis modal modelo apoyo en mesa (apoyo real)

El modelo está ideado para su uso sobre una superficie fija y horizontal, de esta forma un análisis real del mismo parte de establecer unas condiciones de contorno fijas de desplazamientos y giros permitidos nulos en las superficies de apoyo.

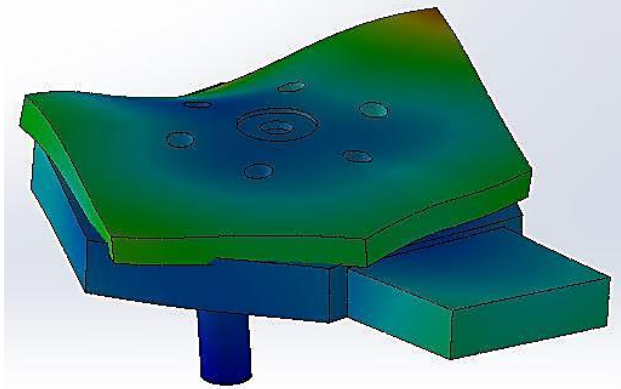
Nombre	Frecuencia
Modo 1	1.50089e+006 Hz



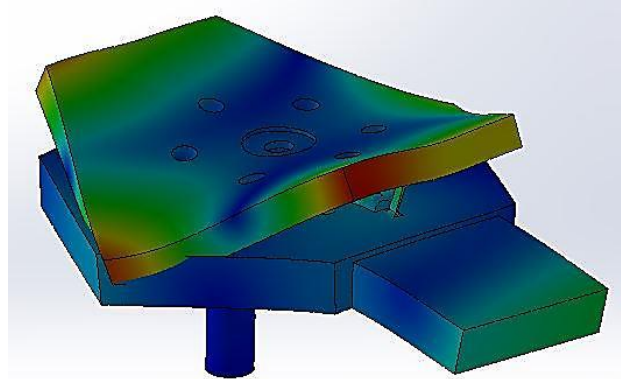
Nombre	Frecuencia
Modo 2	1.67601e+006 Hz



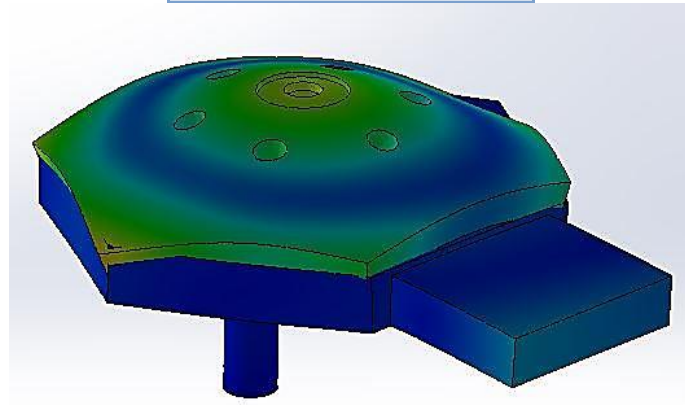
Nombre	Frecuencia
Modo 3	1.73384e+006 Hz



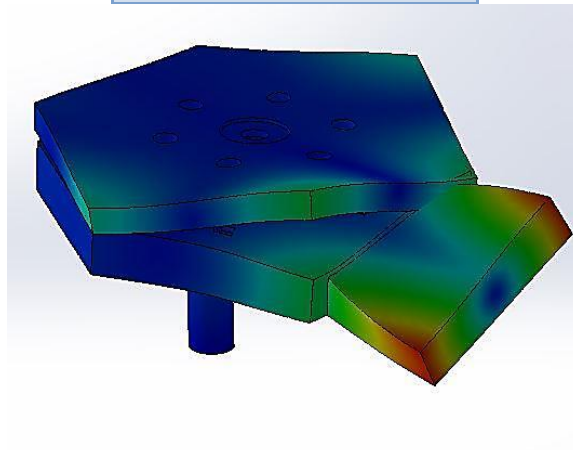
Nombre	Frecuencia
Modo 4	1.79265e+006 Hz



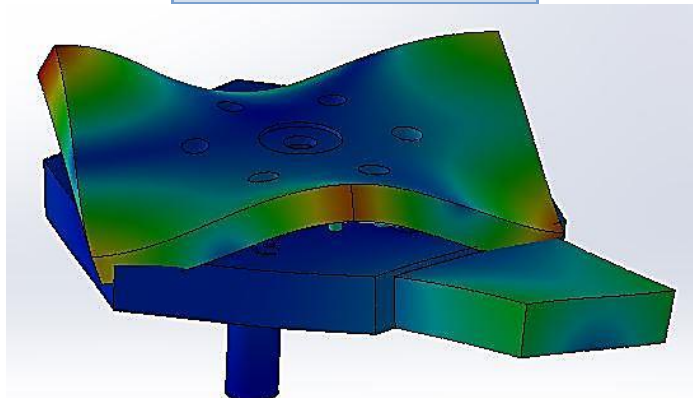
Nombre	Frecuencia
Modo 5	1.94942e+006 Hz



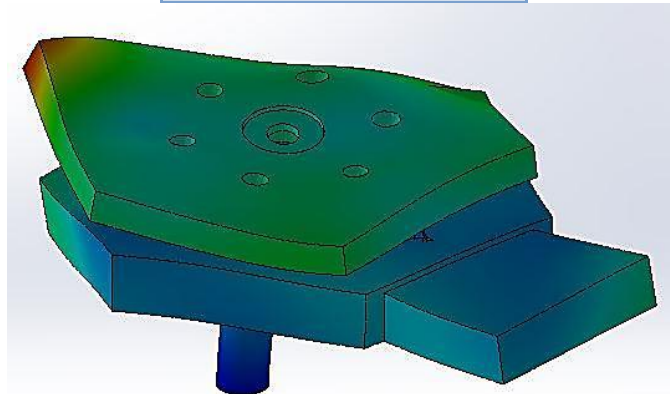
Nombre	Frecuencia
Modo 6	2.14359e+006 Hz



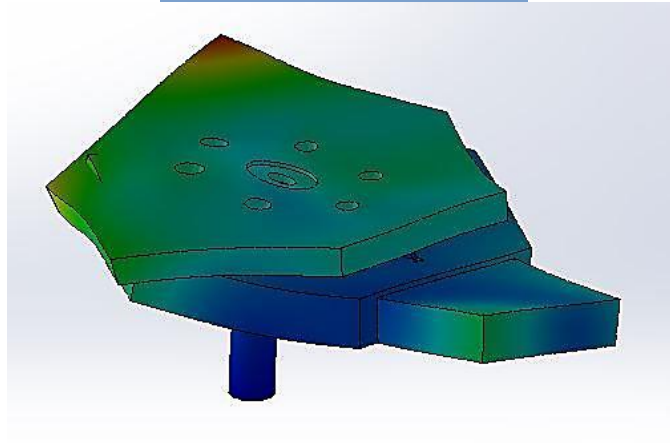
Nombre	Frecuencia
Modo 7	2.35807e+006 Hz



Nombre	Frecuencia
Modo 8	2.45456e+006 Hz



Nombre	Frecuencia
Modo 9	2.48793e+006 Hz



Lista resumen de modos

Número de frecuencias	Rad/seg	Hertz
1	9.4304e+006	1.5009e+006
2	1.0531e+007	1.676e+006
3	1.0894e+007	1.7338e+006
4	1.1264e+007	1.7927e+006
5	1.2249e+007	1.9494e+006
6	1.3469e+007	2.1436e+006
7	1.4816e+007	2.3581e+006
8	1.5422e+007	2.4546e+006
9	1.5632e+007	2.4879e+006

2.4 Conclusiones al análisis computacional

Con los resultados obtenidos de los cálculos realizados por el Método de los elementos finitos y mediante el uso del programa ABAQUS podemos concluir, que la estructura se comporta como un cuerpo extremadamente rígido, visible por sus altas frecuencias naturales. Estas frecuencias se encuentran comprendidas entre 1.000.000 Hz y 2.500.000 Hz, en respectivos cálculos, libre-libre y aplicando condiciones de contorno reales o acordes al uso general del modelo real.

Estas frecuencias naturales tan altas corroboran la rigidez del modelo. En el uso común de la plataforma portátil las frecuencias a las que normalmente podría estar estimulada no superaría, en ningún caso, frecuencias superiores a los 1000 Hz, muy inferiores a la resultantes de las simulaciones como se puede ver.

Por esta razón, la influencia por deformación modal del sistema no es preocupante en el uso del mismo y, por consiguiente, tampoco lo es en el registro de la medida, utilizando los sistemas de captación destinados a este fin y posicionados solidarios a largo de la estructura.

Capítulo 3. Análisis modal experimental del modelo

3.1 Secuencia del ensayo

La secuencia general para la realización de un Ensayo de Análisis Modal (EMA) es:

- Selección de sustentación de la estructura.

Dado la condiciones de trabajo esperadas del dispositivo se optará por ensayar el sistema en condiciones de contorno reales (apoyos), en este caso con el sistema sobre una estructura plana, horizontal y rígida. La realización del ensayo con otro tipo de apoyos, como apoyos suspendido, para la obtención de resultados experimentales no tiene razón alguna, ya que el análisis suspendido permitiría obtener un modelo modal que aportaría información de comportamiento del modelo si fuese a ser introducido, unido o apoyado a otro tipo de componentes estructurales, dado que no es el caso, no es necesario el análisis sujeto a dicha condición de apoyo.

- Definición de los puntos y las direcciones de medida

Es necesario definir un modelo geométrico de la estructura a ensayar. El número de grados de libertad del modelo (Número de nodos X direcciones de medida), el número de estos nodos deberá ser mayor que el número de modos que se desean obtener con objeto de evitar el fenómeno de aliasing espacial, requiere de experiencia o de un conocimiento a priori del comportamiento dinámico de la estructura a ensayar, por ello se ha realizado con anterioridad el ensayo mediante elementos finitos.

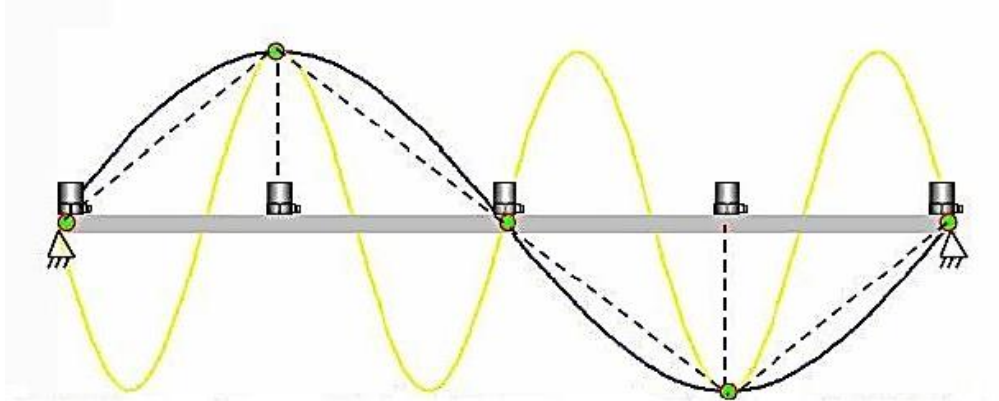


Imagen 18. Descripción del fenómeno aliasing espacial.

La utilización de muchos puntos de medida alarga los tiempos del ensayo y, en muchos casos, no aportan excesiva información adicional.

A partir de la información y los modos de vibración capturados en el análisis explicado en el capítulo 2 de esta memoria, se establecerá el criterio de estimulación y captación en dirección Z, como se puede observar en el dibujo, y se dispondrá de seis puntos de estimulación, correspondientes a los seis extremos de la plataforma, de esta forma se captará los posibles modos de vibración de la plataforma, basándonos en el análisis previo realizado con ABAQUS.

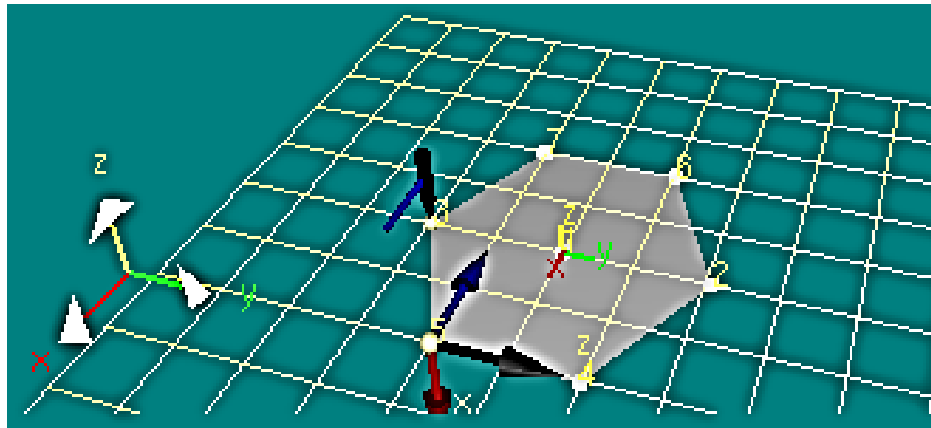


Imagen 19. Disposición de puntos y dirección de la medida

➤ Instrumentación de medida y configuración de equipo

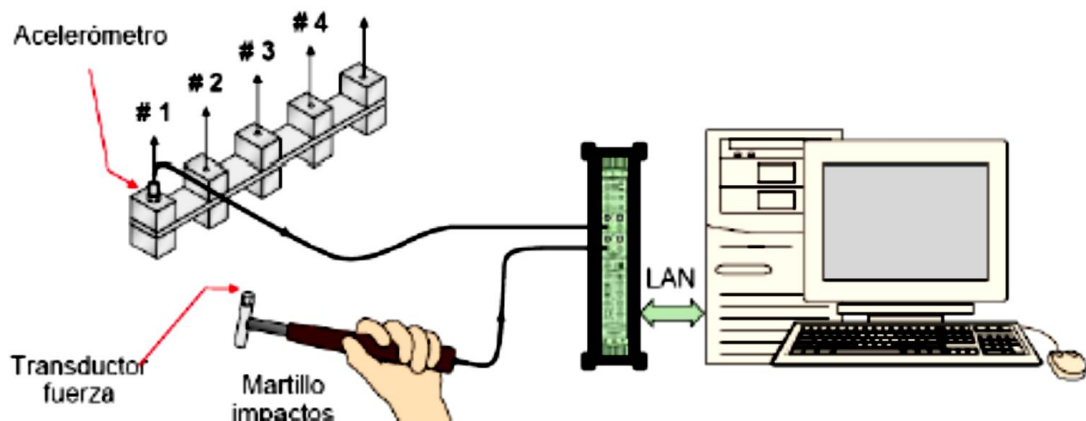


Imagen 20. Dispositivos necesarios para el análisis modal

La instrumentación utilizada consiste principalmente en un excitador, que puede ser un martillo, un mazo o un vibrador. Estos instrumentos estimularán la estructura y su comportamiento será recogido mediante un acelerómetro triaxial adherido a la estructura, la masa despreciable de este dispositivo no tiene influencia perceptible en los resultados modales finales que se obtienen; estas señales son captadas por el acelerómetro y transcritas a una tarjeta de registro y tratamiento de datos que se transfieren mediante red a un dispositivo CPU con software adecuado para el tratamiento y puesta en pantalla de la interfaz y resultados.

La configuración del ensayo partirá de la captación de tres medidas por puntos de impacto en el rango total máximo de frecuencia de captación del dispositivo

disponible en laboratorio (25000Hz), es decir, se obtendrán modos de vibración de acuerdo a las frecuencias naturales del sistema comprendidas entre los 0 Hz hasta los 25000Hz.

➤ Selección del tipo de excitación y secuencia de ensayo

La estimulación del modelo se realiza mediante martillo impactador de punta de acero, estableciendo una secuencia de puntos de ensayo y una localización del acelerómetro de manera.



Imagen 21. Martillo para excitación con punta metálica

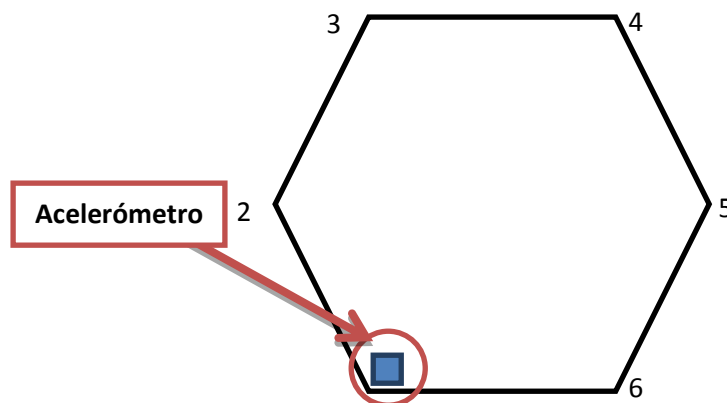


Imagen 22. Vista en planta distribución y secuencia de excitación del ensayo

➤ Registro y validación de datos

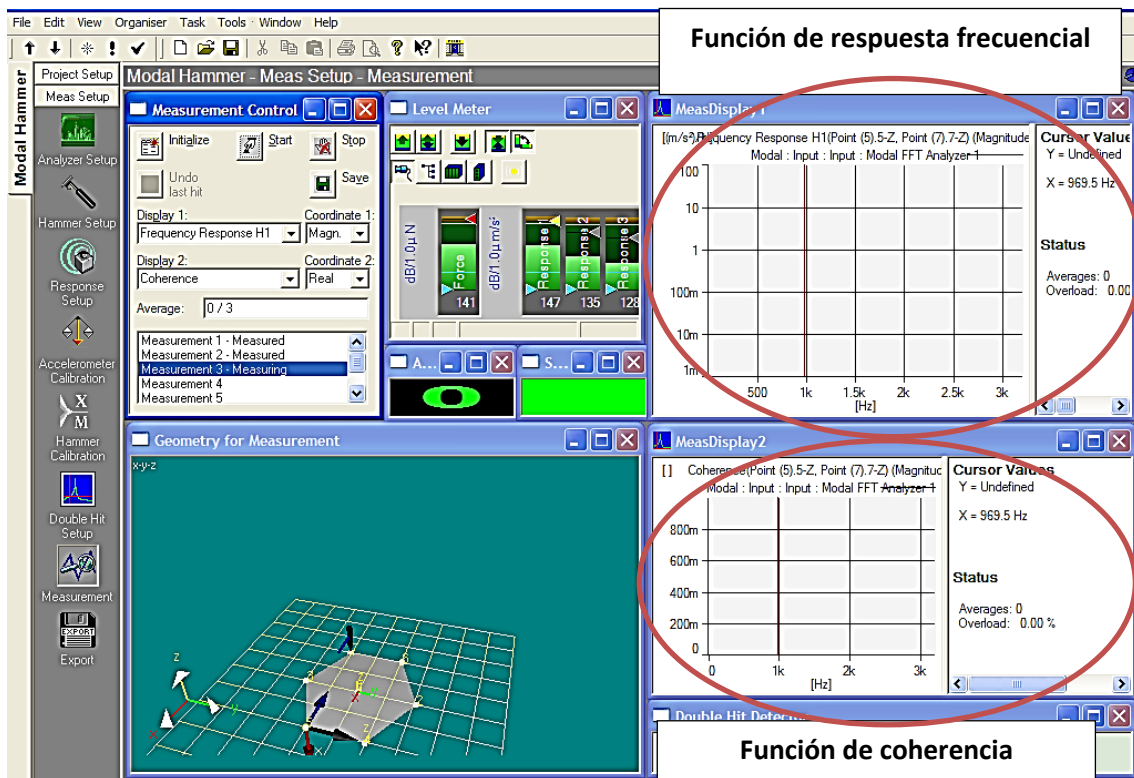


Imagen 23. Interfaz de captación de datos

Durante la realización del ensayo es necesario monitorizar las diferentes señales que se captarán. En este caso, las señales captadas vienen determinados por el martillo excitador con punta metálica para registrar la magnitud de estímulo y el acelerómetro situado en la posición correspondiente para registrar las variaciones de desplazamiento y micro-deformaciones a su alrededor (acelerómetro triaxial), a su vez con la interfaz del programa es visible la saturación de la captación o posibles fallos en medida. Cuando la toma del resultado es correcta, el software analiza y registra la respuesta del modelo en frecuencia, suministrando una función de respuesta en frecuencia y una función de coherencia de los resultados obtenidos durante la medida y las medias de las captaciones durante las diversas estimulaciones en el mismo punto, en este ensayo se realizan tres medidas por punto de estimulación.

➤ Extracción de parámetros modales

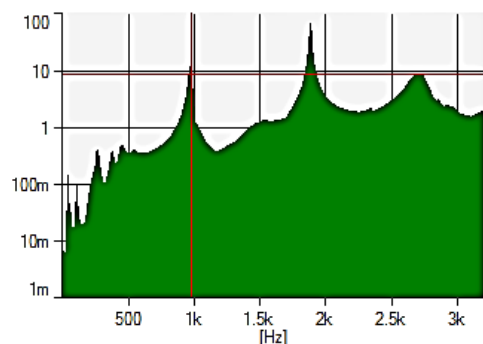


Imagen 24. Extracción de función de respuesta frecuencial

Cada estimulación del modelo recoge su comportamiento en el rango frecuencial establecido obteniendo un gráfico amplitud de respuesta-frecuencia.

Otro parámetro que se extrae del análisis modal por el software es el término de función coherencia, que se define como la porción de la salida que está relacionada linealmente con la entrada. Esta función es real y toma valores entre 0 y 1, únicamente cobrando sentido cuando se hace el promedio de las medidas, tres medidas por punto en el caso de este análisis.

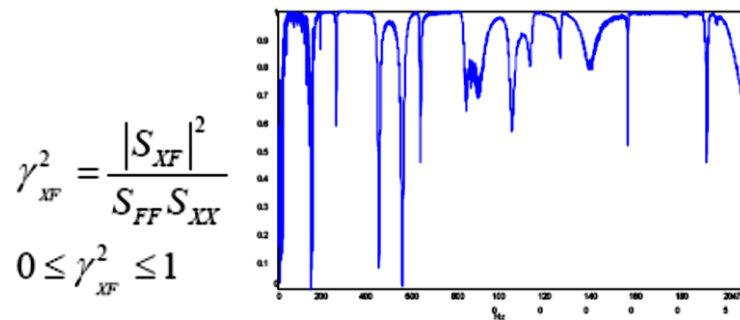


Imagen 25. Función de coherencia

Esta función tomará valor 1 en aquellos picos de resonancia de la estructura, es decir de cada una de las frecuencias naturales del sistema.

➤ Validación de parámetros modales

Para la validación de los datos es necesario establecer unas necesidades básicas en los resultados obtenidos de la Función de respuesta en frecuencia.

- Todos los picos de resonancia que aparecen en los resultados deben tener la misma dirección.

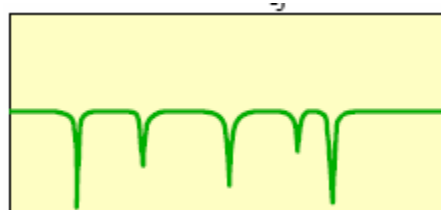


Gráfico 1. Ejemplo ilustrativo de picos de resonancia

- Deberá aparecer anti-resonancias entre dos resonancias consecutivas.

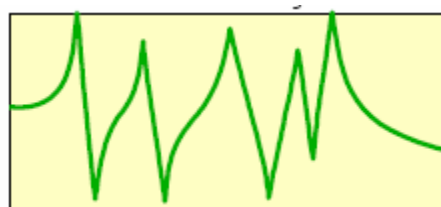


Gráfico 2. Ejemplo ilustrativo de picos de anti-resonancia

- Los cambios de fase han de ser de 180° , es decir en el diagrama de Bode frecuencial resultante deben aparecer desfase de 180° entre

resonancias y anti-resonancias, de manera que ante resonancia las fases caigan 180° y viceversa.

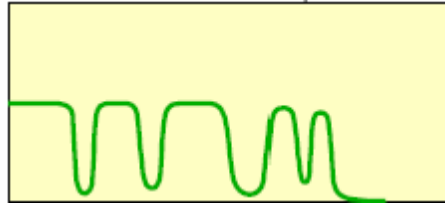


Gráfico 3. Ejemplo ilustrativo desfase 180° - 180° entre resonancias y anti-resonancias

3.2 Realización del ensayo y obtención de modos de vibración y frecuencias naturales

Estableciendo el criterio antes descrito para la realización del ensayo, se llega a una serie de resultados acerca del modelo. Se observan que dentro del rango perceptible por los dispositivos de captación, frecuencia máxima 25000Hz, se registran tres picos de resonancias claros, obteniendo por el software específico HAMMER, los siguientes resultados:

Modo	Frecuencia (Hz)	Desfase (grados)
1	964,5	163,8
2	991,9	180,8
3	1879	170,2

Tabla 1. Número de modos, frecuencias y desfases resultantes del análisis modal de campo

Destacar que con la realización del ensayo, únicamente se han captado tres frecuencias naturales con sus correspondientes modos de vibración. Dos de los primeros tres modos de vibración surgen a frecuencias muy próximas a los 1000Hz, y un tercero a frecuencias cercanas a los 2000 Hz.

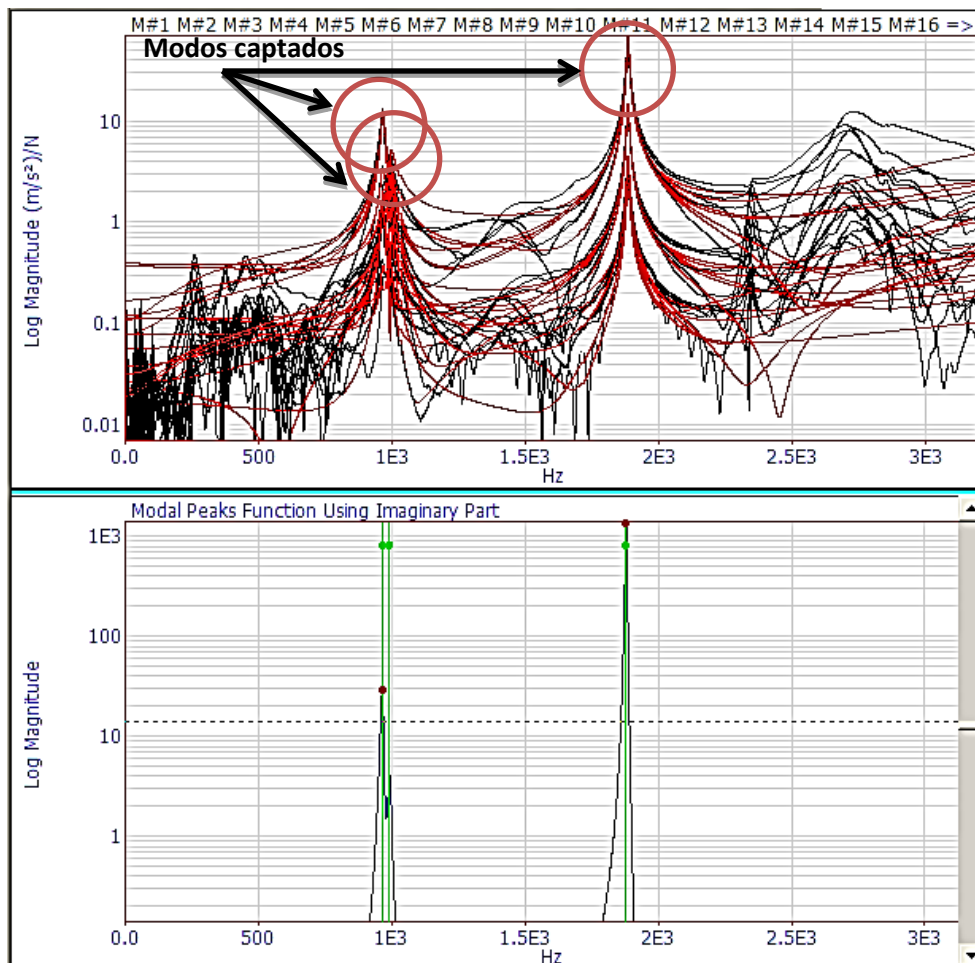


Imagen 26. Función de respuesta en frecuencia del ensayo modal resultante

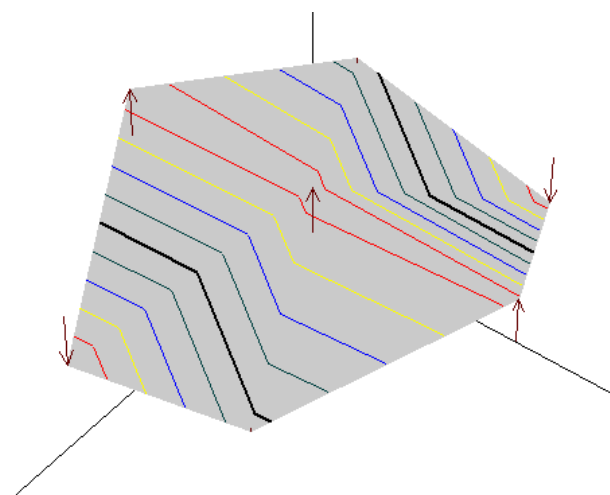


Imagen 27. Modo vibración 1 a 964,5 Hz

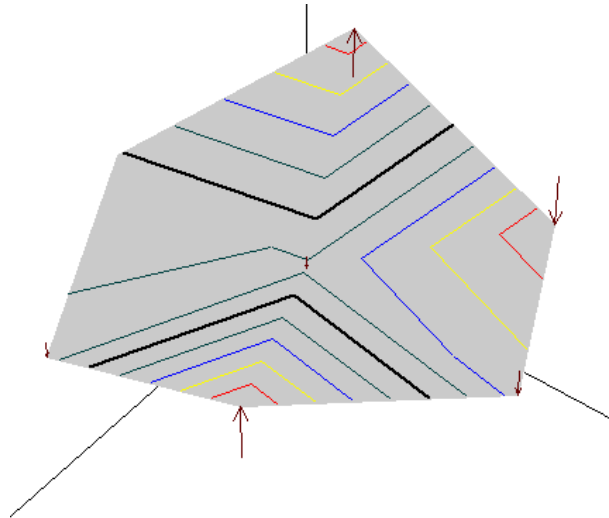


Imagen 28. Modo vibración 1 a 991,9 Hz

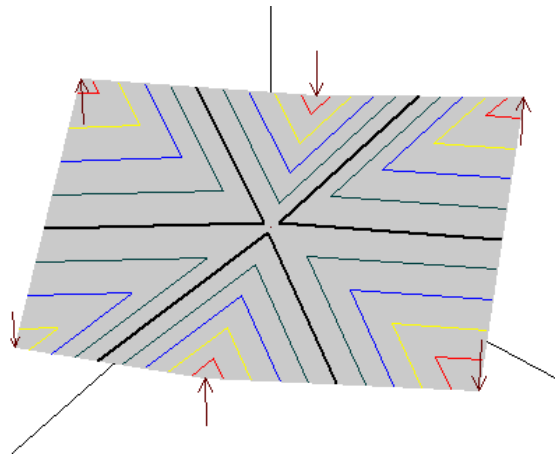


Imagen 29. Modo vibración 1 a 1879 Hz

En comparación con los análisis realizados con el Método de los Elementos Finitos surgen discrepancias claras. Mediante el método computacional aparecen una serie de modos, ya plasmados en la memoria, a frecuencias muy superiores a las captadas por el ensayo, cercanas a los 1000000Hz, en comparación, con el modelo real se obtienen tres modos a frecuencias muy inferiores, por debajo de los 2000Hz, y posteriores modos no visibles con frecuencias por encima de rango de captación del dispositivo captador.

Por consiguiente, se puede afirmar que el modelo computacional generado es poco representativo de la realidad, resultando un modelo mucho más rígido de lo esperado y es necesario realizar una adaptación del mismo con el fin de obtener correlaciones entre el modelo real y el simulado. Otro aspecto que podría justificar las discrepancias y no concluir la incompatibilidad de resultados entre modelos (simulado y real) podría radicar en el propio ensayo experimental realizado. De manera, que es posible únicamente haber captado modos de vibración de la plataforma superior, es decir, los resultados vibratorios generados pueden solo determinar los modos de comportamiento en frecuencia de una parte no significativa del modelo real global, y por ello resultar discrepantes a los simulados completo de modelo.

Para ello se realiza un análisis modal rápido del modelo simulado únicamente con la plataforma superior, con el fin de corroborar esta última hipótesis. Obteniendo los siguientes resultados al respecto:

Modo	Frecuencia (Hz)
1	1170,3
2	1184
3	2211,9

Tabla 2. Resultados modales de ensayo modal realizado por elementos finitos plataforma superior

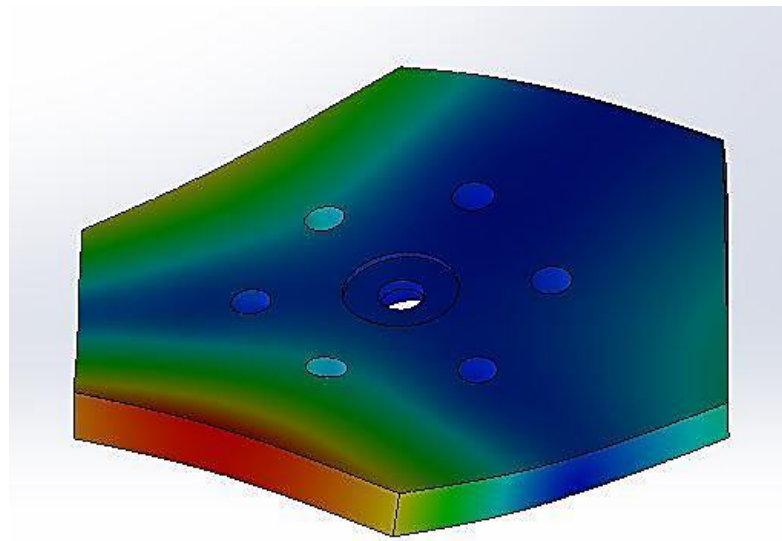


Imagen 30. Modo vibración 1 a 1170,3 Hz

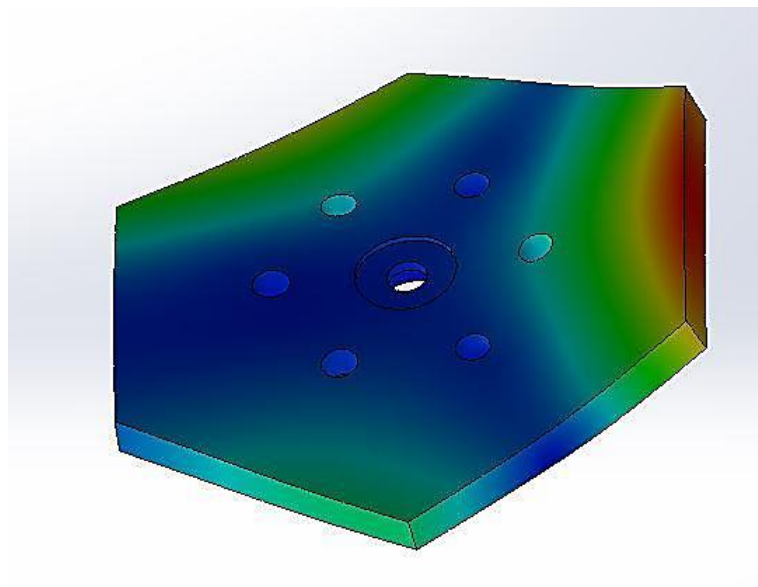


Imagen 31. Modo vibración 2 a 1184 Hz

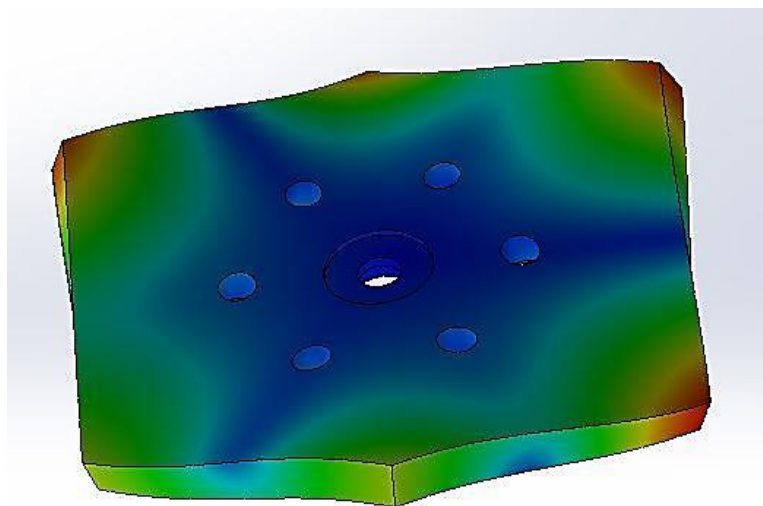


Imagen 32. Modo 3 vibración a 2211,9 Hz

3.3 Conclusiones al ensayo experimental

Tras la realización del ensayo apoyado, disposición real al uso al que está destinado, se han obtenido una serie de frecuencias naturales distintas a las esperadas, dados los resultados obtenidos anteriormente con ABAQUS.

Como se mencionó en el capítulo anterior, era de esperar una gran rigidez del sistema general, con frecuencias del orden de 10^6 Hz. En comparación, los resultados experimentales recogen unas frecuencias del orden 10^3 Hz, es decir, tres órdenes de magnitud inferiores, dando la primera impresión de un modelo computacional muy discrepante con el real, dada las frecuencias tan reducidas en comparación con lo esperado; surge la inquietud de observar si realmente el dispositivo durante la estimulación vibra en conjunto, ya que las frecuencias de vibración están estrechamente ligadas a la masa total del sistema.

De este modo, se plantea la posibilidad de que durante el ensayo se captase únicamente los modos y frecuencias naturales de la plataforma superior del conjunto, de menor masa y, por tanto, daría como resultado frecuencias naturales inferiores, es por ello que se realiza el análisis computacional exclusivamente de la parte superior del modelo.

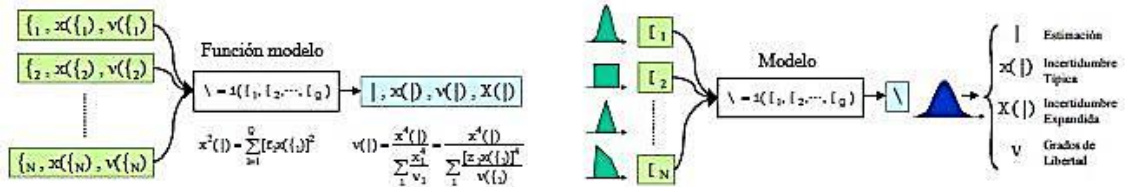
Corroborando el supuesto, las frecuencias resultantes y los modos de vibración corresponden fielmente al modelo real. Dan apoyo al modelo simplificado por ordenador ya que éste se ajusta a la realidad en concepto de comportamiento frecuencia.

Para concluir, con los dispositivos existentes en laboratorio para la realización del ensayo experimental no ha sido posible captar los modos globales del sistema y sus frecuencias, principalmente por las limitaciones de potencia durante la estimulación y el reducido rango de captación de frecuencias por los dispositivos.

Una posible línea futura de trabajo para la continuación de este estudio radicaría en la realización de un ensayo de captación de modos y frecuencias mediante la estimulación de la plataforma multi-registro sobre una mesa o bancada de vibración a tres ejes. Donde con la potencia suficiente y con los hardware adecuados, no disponibles actualmente, se obtendrá la captura de todos los parámetros vibracionales (frecuencias, modos, amortiguaciones, ...).

Capítulo 4. Montecarlo

El método Montecarlo es un método numérico, no determinista o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y resolver problemas físicos y matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias.



Esquema 1. Esquema de cálculo Montecarlo

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_m)$$

(Función modelo)

$$s_Y^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 s_{X_i}^2$$

(Incertidumbre de la salida)

La importancia actual del método Montecarlo se basa en la existencia de problemas que tienen difícil solución por métodos exclusivamente analíticos o numéricos, pero que dependen de factores aleatorios o se pueden asociar a un modelo probabilístico. Gracias al avance en diseño de los ordenadores, cálculos Montecarlo que en otro tiempo hubieran sido inconcebibles, hoy en día se presentan como asequibles para la resolución de ciertos problemas. En estos métodos el error $\approx 1/\sqrt{N}$, donde N es el número de pruebas y, por tanto, ganar una cifra decimal en la precisión implica aumentar N en 100 veces. La base del cálculo es la generación de números aleatorios para calcular probabilidades.

4.1 Fases del proceso de estimación de la incertidumbre de medida

Se clasificará el proceso de estimación de incertidumbres para este trabajo de una manera muy diferenciada:

1º Formulación del Método, incluyendo:

- Definición de la magnitud de salida.
- Determinación de las magnitudes de entrada disponibles y necesarias y el desarrollo del modelo matemático que vincule las salidas y la entrada.
- Asignación de las distribuciones estadísticas de las entradas.

2º Propagación de las distribuciones de las magnitudes de entrada a través del modelo planteado para obtener la distribución de salida.

3º Resumen, donde se estima la magnitud de salida, de su incertidumbre y de los intervalos de cobertura.

4.2 Ejecución del modelo Monte Carlo mediante parámetros de medida experimentales para el modelo en cuestión.

Desarrollando el procedimiento para la determinación de las incertidumbres de medida es necesario comenzar con el establecimiento de la magnitud de salida deseada para el sistema.

La variable de salida de la plataforma, que determinará las coordenadas medidas por el instrumento que se monte en el sistema de referencia inferior de la plataforma, es la posición y orientación del sr plataforma superior respecto al sistema de referenciar plataforma inferior, representada mediante una matriz obtenida a partir de una serie de parámetros geométricos calibrados previos, además de las lecturas de los 6 sensores capacitivos. El resto de la cadena de medida depende del instrumento y de su relación con el sistema de referencia plataforma superior.

En este apartado se pretende caracterizar la influencia sobre la incertidumbre de medida de la propia plataforma durante su uso, por lo que no se considerarán dentro de la simulación de Montecarlo ni el propio instrumento ni su relación con el sistema de referencia plataforma superior, que es constante y, a su vez depende de mediciones con el propio instrumento. Tampoco se considera la incertidumbre de calibración de la plataforma.

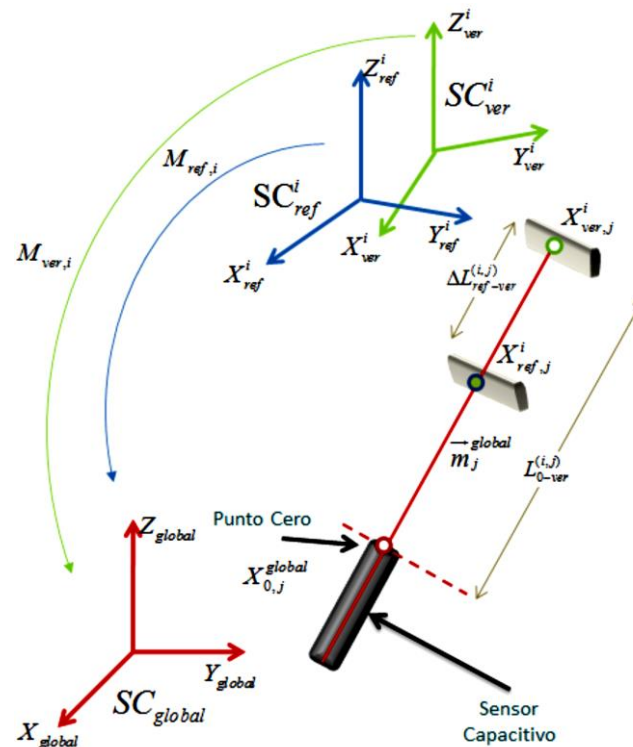


Imagen 33. Esquema general de los parámetros de salida deseados.

En la imagen se puede apreciar un esquema elemental para la determinación de las salidas deseadas y requeridas. De esta forma, existe la necesidad de obtener las posiciones y posibles giros establecidos y capturados por los sensores de medida activos en cada medida. Determinando unas magnitudes de salida que se definirán como:

$X \rightarrow$ Posición respecto al eje X
 $Y \rightarrow$ Posición respecto al eje Y
 $Z \rightarrow$ Posición respecto al eje Z
 $\alpha \rightarrow$ Giro respecto al eje X
 $\beta \rightarrow$ Giro respecto al eje Y
 $\gamma \rightarrow$ Giro respecto al eje Z

Obteniendo de la ejecución de Montecarlo un resultado esperado con una configuración de matriz para los n valores aleatorios introducidos:

$$\begin{pmatrix} x_i & \cdots & \gamma_i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n & \cdots & \gamma_n \end{pmatrix}$$

Que determinarán diferentes distribuciones para cada salida y la determinación de la incertidumbre de medida de cada parámetro de la salida.

Posteriormente, es necesario establecer la definición de las variables de entrada en el método de estimación de la incertidumbre. Estas señales de entrada corresponderán a la captación de señales de los sensores/targets dispuestos a lo largo de la plataforma inferior y superior. Estas señales, a su vez, están sometidas a diferentes incertidumbres de medida como los errores propios del aparato de medida que el fabricante informa en las características técnicas del dispositivo.

Para ello, es necesario que mediante matemática computacional se determine las distribuciones que mejor se ajustan a cada una de estas posibles influencias de medida. Determinando:

- Errores de medida del fabricante, según las especificaciones del fabricante de los sensores es posible la aparición de una serie de errores que generan variaciones de la medida real del sensor, estos son definidos como:

- Error de sensibilidad se presenta generalmente como un porcentaje de la pendiente; comparando la pendiente ideal, con la pendiente real.

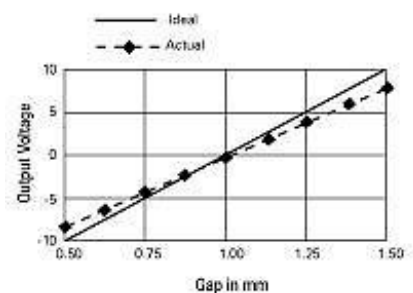


Gráfico 4. Sensibilidad del sensor

- Error Offset. Este tipo de error surge cuando se añade un valor constante de la tensión de salida del sistema, estos errores típicos surgen de la influencia de factores como la temperatura, donde añadiendo un desplazamiento constante se puede mantener este error a menos de 0,04% FS / ° C del error máximo cometido en medida.

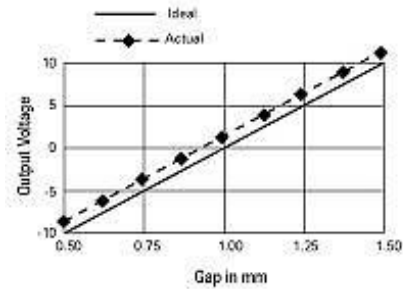


Gráfico 5. Offset en salida del sensor

- Error de linealidad, los datos de calibración se compara con la línea recta que mejor se ajusta a los puntos. Esta recta de referencia se calcula a partir de los datos de calibración usando una técnica llamada de mínimos cuadrados apropiado. La cantidad de error en el punto de la curva de calibración que está más lejos de esta línea ideal es el error de linealidad. Error de linealidad se expresa habitualmente en términos de porcentaje de la escala completa. Si el error en el peor momento fue 0,001 mm y el rango de la escala completa de la calibración fue de 1 mm, el error de linealidad sería del 0,1%.

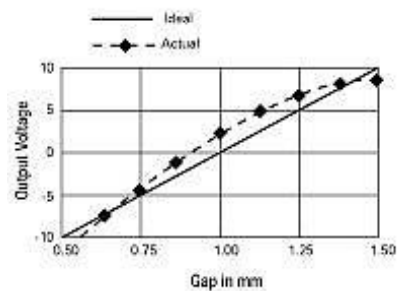


Gráfico 6. Error de linealidad del sensor

La banda de error representa la combinación de errores de linealidad y sensibilidad. Es la medida del error absoluto en el rango calibrado. La banda de error se calcula comparando los voltajes de salida a su valor esperado. El error más desfavorable de esta comparación se muestra como la banda de error del sistema, y es aportada por el fabricante como un valor en % de la medida realizada por el sensor. Además, es posible ajustarla a una distribución uniforme, para ser utilizada en el análisis de Monte Carlo, centrada en la medida del sensor y de extremos de probabilidad:

$$\text{Incertidumbre de la medida} = \pm \text{Error}(\%) \cdot L$$

Siendo:

Error(%)= porcentaje de error de medida.

L= rango de medida del sensor (100 μm)

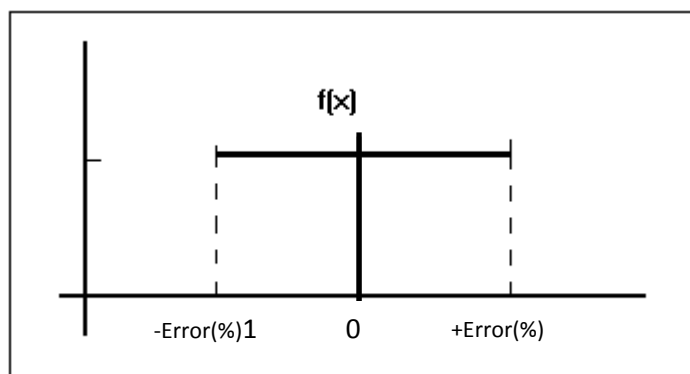


Gráfico 7. Distribución del error de medida del sensor capacitivo

- Variaciones de la medida debido a ruidos de medida, ajustados a una distribución normal.

Para conocer la influencia de los ruidos existentes en los sensores de medida se realiza una serie de captación continua de medida con la plataforma en condiciones preparadas para su funcionamiento. La captura se realizará durante un segundo y se tomarán mil datos.

Obteniendo como resultado una gráfica de ruido real para cada sensor de medida.

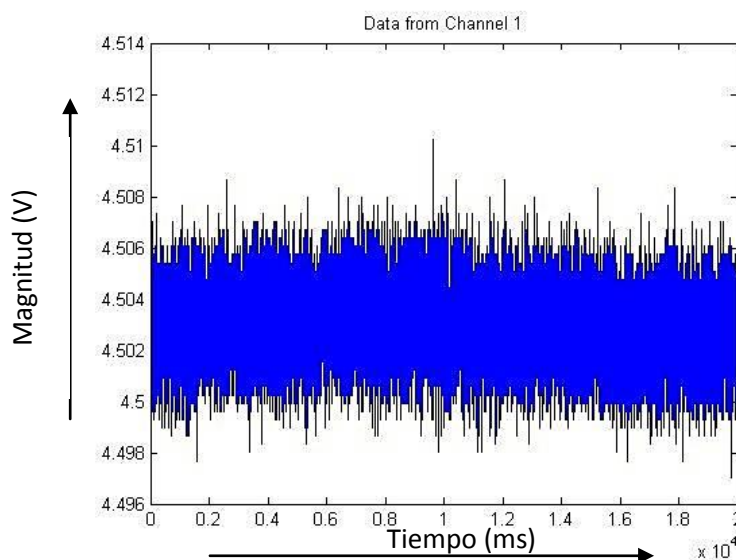


Imagen 34. Captura en continuo del ruido señal en precarga 1000 medidas duración 1 sg

Con el objeto de conocer cuáles son las frecuencias predominantes del ruido de medida, resulta de interés la obtención de la función de Fourier que rige esta señal mediante MATLAB, utilizando las funciones integradas en el software se puede determinar esta función.

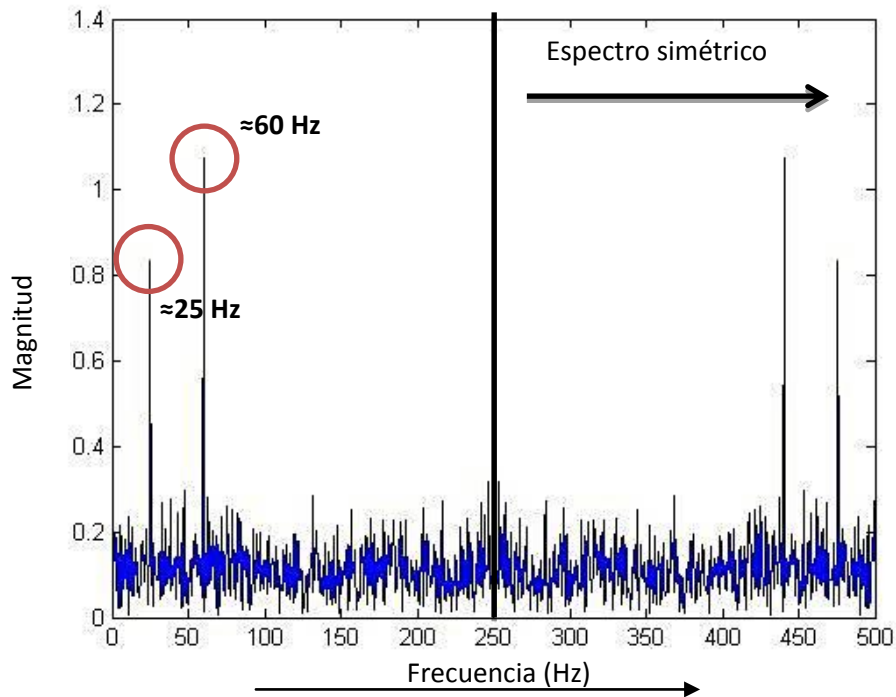


Imagen 35. Función rápida de Fourier

Como puede observarse en la función rápida de Fourier obtenida, existe una influencia principal de frecuencias a baja frecuencia (25Hz y 65Hz) y gran número de pequeños armónicos de alta frecuencia, cuyo peso en la señal no es tan influyente. Resultando una función temporal de la forma que podemos ver en el gráfico, representada en otra escala de tiempo para visualizar los diferentes armónicos principales que la componen.

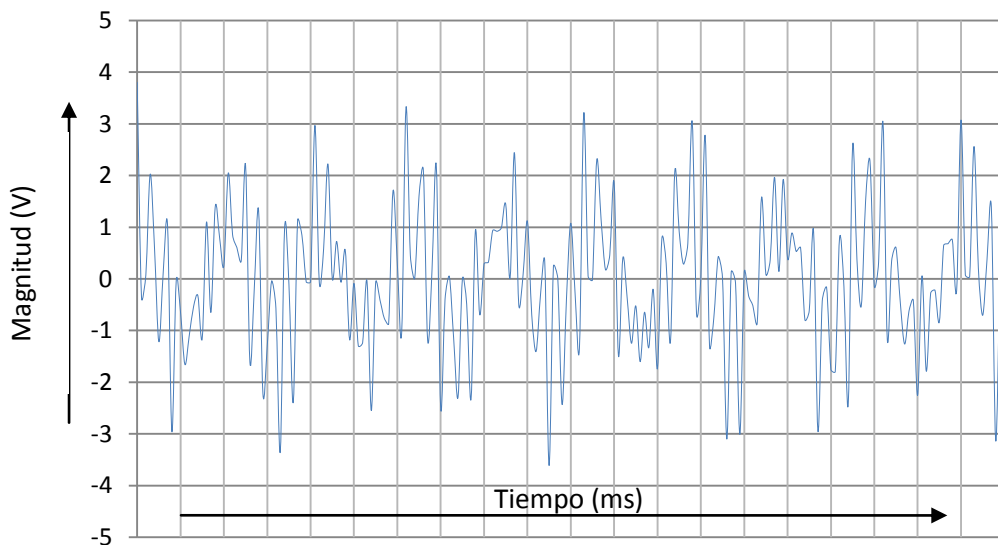


Gráfico 8. Un ciclo de señal compuesta por principales armónicos de Fourier

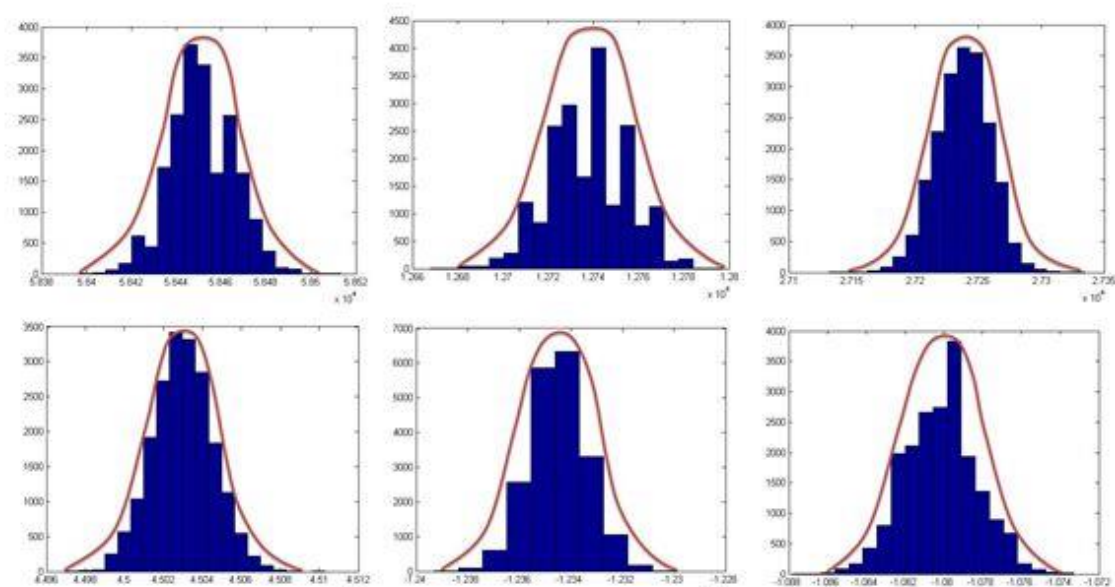


Gráfico 9. Ruido de medida de los sensores sometidos a precarga de 4 Bar de la estructura

	Media(mV)	Desviación estándar
Sensor 1	4.5030	0.0014
Sensor 2	1.2344	0.0012
Sensor 3	1.0807	0.0018
Sensor 4	5.8458	0.0014
Sensor 5	1.2730	0.0016
Sensor 6	2.7235	0.0012

Tabla 3. Medidas de ruido por captación en continuo 1000 medidas por segundo

Con la razón de introducir los parámetros de ruido de cada uno de los sensores capacitivos dentro de la simulación de Montecarlo, es necesario conocer su comportamiento estadístico. De esta manera, se tratan los datos capturados anteriormente y se ajustan a una distribución tipo. Apreciando que todos ellos se ajustan fielmente a una distribución normal, mediante el uso de MATLAB, quedando totalmente caracterizados, tanto en media estadística como en desviación estándar, para poder ser introducidos como parámetros de entrada correspondientes en la función global para la simulación de Montecarlo.

Planteamiento de la función modelo que rige el comportamiento del sistema a simular.

La disposición de sensor/target, en ambas placas de la plataforma, establece la necesidad de definir sistemas de coordenadas para cada una de las placas. Estos sistemas de coordenadas permitirán calcular las matrices de transformación homogéneas que expresen las lecturas de la placa móvil en el sistema global de la placa fija. Permitiendo localizar la posición (X, Y y Z) para cualquiera de los sensores/targets capacitivos existentes en la plataforma y que pueden corresponder, indistintamente, a cada una de las seis posiciones y para cada uno de los posibles puntos de medida del dispositivo palpador. Determinando un vector distancia respecto de ejes móviles, referenciados a la placa móvil o a los ejes globales solidarios a la placa inferior (plataforma fija).

Obsérvese que para cada posición se tendrán seis targets utilizados y seis no utilizados, variando éstos en cada posición según la disposición establecida cada 60°. De esta manera, se obtienen seis lecturas de sensores en plataforma que denominaremos de L_1 a L_6 . En la imagen ilustrativa del comienzo se aprecia, esquemáticamente, la relación existente entre ejes y coordenadas para la suposición de un único sensor posicionado. En el caso completo se debería contemplar la existencia de otros cinco sensores.

Estas consideraciones solo abarcan los aspectos geométricos del sistema, pero es necesario entrelazar, mediante funciones matemáticas, la física global del sistema, en ello radica la dificultad de definir totalmente la estructura de la función de transferencia íntegra que rige el sistema completo.

Esta función global es incluida dentro de la programación de Montecarlo, integrada en el código de Matlab, como *MatrizdeCambio.m*, donde al introducir los diferentes parámetros de entrada, se obtiene la matriz deseada correspondiente a la matriz geométrica de la plataforma superior. Determinando un serie de distribuciones de medida correspondiente al eje X, Y, Z y los giros en los α , β y γ , respectivamente.

4.3 Resultados obtenidos en Montecarlo para un caso general

En este estudio, para la determinación de la salida es necesario establecer las capturas nominales de los sensores en un caso específico de medida. En esta memoria se opta por localizar la plataforma en una posición de giro de las seis posibles, seis giros equivalen una rotación total en el eje Z de la plataforma. Implantando los aspectos técnicos necesarios, sensibilidad del sensor, aspectos de geometría y demás parámetros relevantes.

Los parámetros principales para la generación de Montecarlo para este trabajo se basan principalmente:

- Número de iteraciones, se consideraran para la ejecución en este trabajo 1000.
- Medidas nominales de los sensores capacitivos y errores de banda propios de cada uno de los mismos para la posición elegida.

	Medida nominal (μm)	Error de banda(%)
Sensor 1	108.51337	0.16
Sensor 2	125.4271	0.1
Sensor 3	144.3024	0.08
Sensor 4	118.7031	0.13
Sensor 5	148.8461	0.15
Sensor 6	1.091777	0.13

Tabla 4. Medidas nominales sensores capacitivos y errores de banda en posición 1, para simulación de Montecarlo

Generando como entradas a la simulación:

Canal 1, correspondiente a un sensor, introduciendo un vector de dimensión n , en relación a las iteraciones que se deseen realizar, y presentando una distribución de posibles medidas aleatorias.

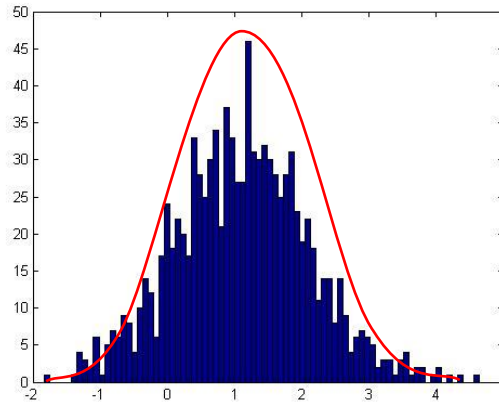


Imagen 36. Entrada sensor capacitivo para Montecarlo

Con entradas similares para los otros 5 sensores de captación. Introducidos en el correspondiente código, no publicado en esta memoria, se obtiene como resultado una matriz de dimensiones $6 \times n$. Resultando:

Eje X:

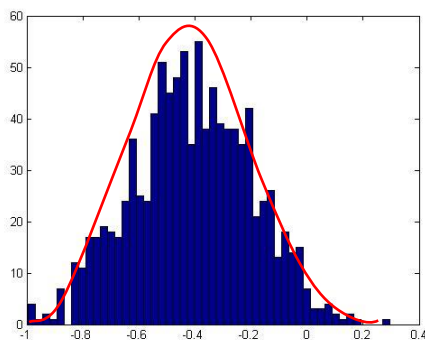


Imagen 37. Salida Montecarlo
eje X, media -0.4095mm,
desviación 2.256

Eje Y:

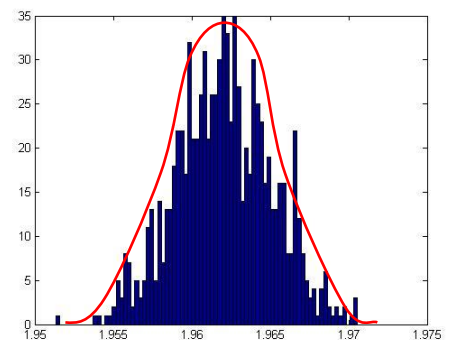


Imagen 38. Salida eje Y, media
196.2mm, desviación 3.0481

Eje Z:

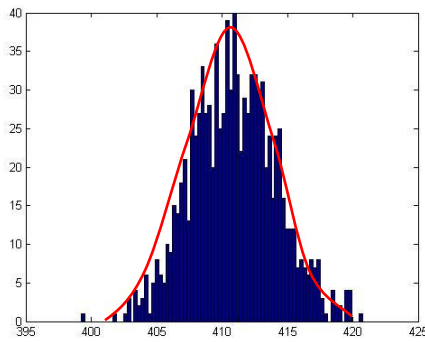


Imagen 39. Salida Montecarlo eje Z, media 410.912mm, desviación 2.5678

Giro eje Y(β):

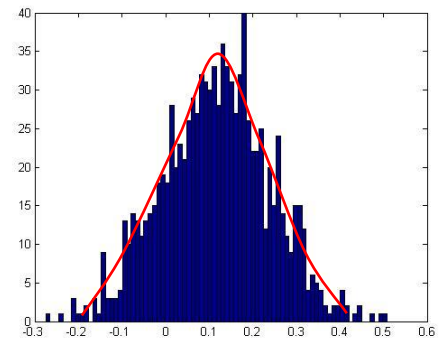


Imagen 41. Salida Montecarlo giro en Y, media 0.1166°, desviación 0.1229

Giro eje X (α):

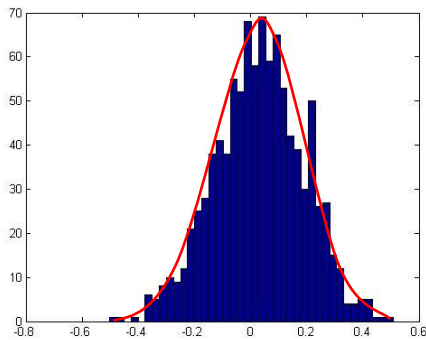


Imagen 40. Salida Montecarlo giro en X, media 0.0319°, desviación 0.1584

Giro eje Z(γ):

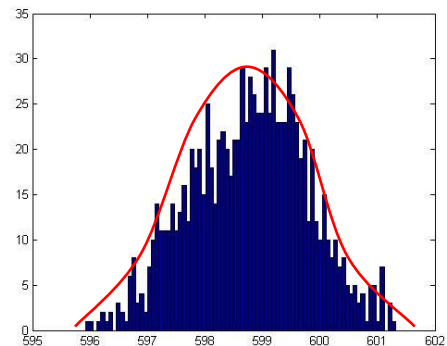


Imagen 42. Salida Montecarlo giro en Z, media 59.877°, desviación 1.0088

Eje/giro	Media (mm)	Desviación estándar	Intervalo de confianza (95%)
X	-0.4095	2.256	[-0.8562, 0.1021]
Y	196.200	3.0481	[195.5820, 196.8030]
Z	410.912	2.5678	[403.2192, 417.317]
α	0.0319	0.1584	[-0.2998, 0.3273]
β	0.1166	0.1229	[-0.1281, 0.3516]
γ	59.87719	1.0088	[596.7640, 600.7550]

Tabla 5. Medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza del 95% de la matriz (X Y Z α β γ)

Se puede observar que las salidas, en cada uno de los ejes, tienden a ajustarse a una distribución de probabilidad Normal, centradas en un valor medio y una desviación estándar determinada. De esta forma, se pueden establecer ciertos límites o parámetros de confianza en la medida para cada uno de los ejes y sus correspondientes giros. Es decir, dependiendo de la precisión, del intervalo de confianza que se desee, se es capaz de determinar una medida del sistema entorno a un rango de posibles medidas.

Hay que mencionar que el sistema completo, como se ha visto, consta de la plataforma más el brazo palpador y este, a su vez, determina un serie de medidas durante su uso.

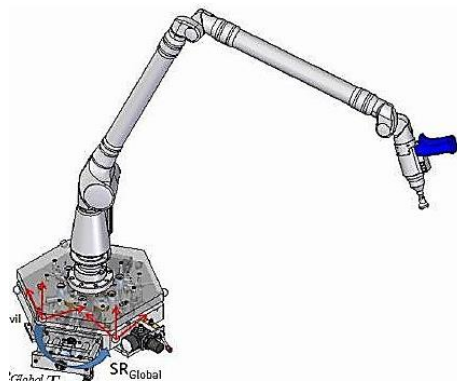


Imagen 43. Conjunto plataforma+brazo articulado

Para poder ser incluido la medida realizada por el palpador y ser integrada en los parámetros de Montecarlo, es necesario realizar una traslación de la medida a la matriz de la plataforma superior, de manera que dichas medidas, con sus errores e incertidumbres, queden recogidas en la matriz resultante del Montecarlo, matriz (X, Y, Z, α , β , γ).

Para ello es necesario incluir una matriz que se denominará:

$$M_{SR_BRAZO}^{Sup}$$

De esta manera, para completar todas las consideraciones durante el uso de la plataforma con un brazo articulado palpador basta con incluir las medidas obtenidas de dicha palpador, trasladando a otro sistema de coordenadas, plataforma superior, mediante la matriz anterior e incluirla en la traslación a la plataforma inferior, modificando la matriz resultante (X, Y, Z, α , β , γ).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{P.inferior} = M_{P.superior\ i}^{P.inferior} \cdot M_{SR\ Brazo}^{SR\ p.superior} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{Medida\ brazo}$$

4.4 Conclusiones a los resultados de la simulación de Montecarlo

Como conclusión a los resultados obtenidos en la simulación, la tendencia de estos es a una distribución Normal, centrada respecto a una medida y como una desviación estándar en la probabilidad de medida. De esta forma, se puede observar que los resultados obtenidos, tanto de ejes (X,Y,Z) como respecto a los giros, de la plataforma siguen un comportamiento similar.

La calidad de los resultados obtenidos depende estrechamente del número de iteraciones que se desea realizar, parámetro n del código programado en Matlab. Este parámetro determina el número de simulaciones aleatorias que se desean introducir dentro de la función global, de donde se obtiene las consecuencias probabilísticas. Este tipo de simulaciones se realizan con un número elevado de iteraciones, en torno a 100.000 y el 1.000.000 de las mismas, generando una nube de posibles medidas aleatorias, más densa, y permitiendo ajustar, de manera más precisa, el comportamiento de las medidas a un histograma que facilite visualizar la tendencia de los resultados.

El número de iteraciones, n, guarda estrecha relación con el consumo computacional del cálculo. De esta forma, un elevado número de iteraciones origina un aumento de este consumo de manera exponencial. Un aspecto importante a la hora de lanzar este cálculo es la

búsqueda de un número de repeticiones que permita reducir en gran medida el coste computacional y, a su vez, permitir una adecuada calidad de los resultados. Específicamente, el cálculo mostrado en esta memoria es realizado, para un caso de localización de la posición de la plataforma durante su uso en laboratorio, en un caso real, seleccionando un número de repeticiones igual a 1000 casos. Como puede verse, los resultados guardan un comportamiento muy claro y determinado que antes ya se ha destacado.

Una posibilidad es el aumento del número de repeticiones, con el fin de obtener a posteriori resultados más ajustados, con el consiguiente coste. Es por ello, que se plantea la necesidad de aumentar la simulación en un número de repeticiones más próximo a los 100.000 datos aleatorios.

Para esta memoria, lo obtenido en la simulación permite dar imagen cualitativa de los resultados que se obtendrán en cálculos de futuras líneas de trabajo.

Conclusiones generales al Proyecto

Como cierre de esta memoria, resultado del trabajo realizado, se puede determinar que lo desarrollado, a lo largo de esta exposición escrita, revela la investigación y desarrollo que se ha realizado para este particular sistema de medición por coordenadas portátil.

Como ya se ha justificado, la realización de los ensayos modales mediante ensayos de laboratorio por ordenador, con el uso de softwares específicos, HAMMER y ABAQUS respectivamente, permiten conocer el comportamiento teórico y real del modelo, con el objeto de establecer correlaciones entre los diferentes modelos, teórico y experimental.

Como conclusión a los ensayos modales, destacar la correlación obtenida del conjunto, al menos del modelo perteneciente a la plataforma superior. Se ha podido obtener una serie de resultados frecuenciales y modos de vibración en paralelo a la realidad. Este modelo limitado permite conocer parte del comportamiento ante frecuencias de excitación del sistema completo y permitiendo, posteriormente, estudiar otros posibles efectos externos sobre, al menos, parte del modelo y durante su uso en laboratorio. Es decir, se ha obtenido un modelo simplificado para posibles cálculos a posteriori.

La obtención de parte de un modelo simplificado es debida, principalmente, a múltiples restricciones. Estas limitaciones principalmente han sido originadas debido a las dimensiones, peso y elevadas rigideces que impedían caracterizar de manera real mediante ensayos experimentales el modelo teórico. Otra limitación existente ha sido los sistemas captadores de frecuencia de los que se dispone, muy limitados en su rango de frecuencias, restringiendo los resultados y, por tanto, otros posibles modos de vibración y frecuencias naturales superiores al rango de medida máximo de los dispositivos.

Resumiendo el conjunto global, los resultados obtenidos teóricos determinan que el sistema tiene un comportamiento extremadamente rígido, claramente observable en las altas frecuencias obtenidas por los cálculos realizados mediante el Método de los Elementos Finitos.

Destacar que, durante el ensayo experimental la captación de los modos de vibración obtuvo únicamente los modos pertenecientes a la plataforma superior, generando la duda de si el sistema es factible presentarlo como un modelo único, o constituido por dos partes diferenciadas, plataforma superior y plataforma inferior, durante sus usos en condiciones normales. Determinando, a fecha de la redacción de este trabajo, que el modelo obtenido por computador únicamente puede asegurarse que es fiel a la realidad, en términos y modos de vibración, para la plataforma superior del conjunto.

La obtención de esta simulación, aplicando el método de Montecarlo, permite visualizar el comportamiento teórico de la medida de la plataforma de manera probabilística, asegurando una medida real del dispositivo y una incertidumbre con intervalos de confianza altísimos si fuese necesario.

Para terminar, es necesario establecer unas líneas futuras de trabajo que podrían resultar interesantes al finalizar este trabajo final de master. Comenzando con un análisis modal extenso y externo al departamento. Donde se disponga de dispositivos con potencia suficiente para excitar frecuencialmente la totalidad del conjunto y así determinar todos los modos de vibración existentes en un rango de altas frecuencias y, además, sustituir los equipos limitados en la medida del rango de frecuencias por otros superiores que permitan la captación con mayor precisión.

Otra línea de avance paralela sería la determinación de un modelo computacional para el estudio del comportamiento ante esfuerzos mecánicos puntuales o la influencia de parámetros externos al dispositivo, tales como golpes, inercias, temperaturas de trabajo, humedad. Con este modelo, a su vez, sería necesaria la implementación de sub-rutinas, para la determinación y captación de parámetros y características en diferentes puntos de interés del modelo de la plataforma.

En lo correspondiente a la simulación generada por Montecarlo, parece de interés realizar un estudio de mayor precisión, incrementando el número de iteraciones y por consiguiente una mayor calidad de los resultados. Además, es de utilidad introducir, en la señales de captación y entrada en la función global del modelo, otras posibles incertidumbres que alteren la captación de los sensores generando un modelo más real y más controlado de la medida del sistema y su incertidumbre.

Para perfeccionar esta memoria me permito recalcar, e insistir, en la motivación y continuación de las futuras líneas de investigación en estos nuevos sistemas de medición y otros dispositivos que podrían cambiar la percepción de la metrología ingenieril en un espacio de tiempo cercano.

Bibliografía

A.BRAU, TESIS DOCTORAL, *"DISEÑO, FABRICACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA PLATAFORMA MULTI-REGISTRO PARA LA VERIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDIR POR COORDENADAS PORTÁTILES"*, Universidad de Zaragoza, Junio 2013

Randall Allemang, James De Clerck, Christopher Niezrecki, Alfred Wicks, *"Topics in Modal Analysis, Volume 7"*, Conferencia sobre Dinámica Estructural, 2013

G. Niemann, *"Tratado teórico-Práctico de ELEMENTOS de MÁQUINAS, Cálculo, diseño y construcción"*, Munich

G. Daza *"VIBRACIONES MECÁNICAS"*, Mecánica de procesos y Mantenimiento Industrial, Universidad Federico Santa María, 2007

Nuno M.M. Maia, *"Theoretical and Experimental Modal Analysis"*

DDS, *"Manual de Usuario de ABAQUS 6.10.1"*

W. T. Thomson, *"Teoría de Vibraciones"*

S. Timoshenko, *"Resistencia de materiales, teoría elemental"*, Espasa-Calpe S.A., Madrid 1957

C. Pérez, *"Análisis matemático y algebra lineal con MATLAB"*, Ra-ma, 1999

J. H. Mathews, K. D. Fink, *"Métodos numéricos con MATLAB"*, Tercera edición, Prentice Hall, 1999

I. M. Sóbol, *"Lecciones populares de matemáticas, MÉTODO DE MONTECARLO"*, Editorial MIR, Moscú 1976

Índice de Imágenes

Imagen 1. simplificación uniones atornilladas	9
Imagen 2. Ejemplo1 simplificación esfera posicionamiento	10
Imagen 3. Ejemplo proceso simplificación soporte sensor horizontal	11
Imagen 4. Simplificación de casquillo por eliminación del cuerpo	12
Imagen 5. Modelo CAD completo, Plataforma + Brazo de medida	12
Imagen 6. Modelo CAD completo sin brazo de medida.....	13
Imagen 7. Componentes mecánicos de placa fija global	14
Imagen 8. Simplificación de cilindro de acoplamiento	15
Imagen 9. Componentes mecánicos y geometría final de placa fija simplificada	16
Imagen 10. Componentes mecánicos de placa móvil	17
Imagen 11. Componentes mecánicos y geometría final de placa móvil simplificada	18
Imagen 12. Simplificación final para el posterior análisis mediante ABAQUS.....	18
Imagen 13. Importación de modelos para análisis modal	22
Imagen 14. Modelo importado	22
Imagen 15. Inserción de materiales en ABAQUS	23
Imagen 16. Mallado resultante	24
Imagen 17. Detalle mallado elementos de posicionamiento	24
Imagen 18. Descripción del fenómeno aliasing espacial.....	35
Imagen 19. Disposición de puntos y dirección de la medida	36
Imagen 20. Dispositivos necesarios para el análisis modal.....	36
Imagen 21. Martillo para excitación con punta metálica	37
Imagen 22. Vista en planta distribución y secuencia de excitación del ensayo.....	37
Imagen 23. Interfaz de captación de datos.....	38
Imagen 24. Extracción de función de respuesta frecuencial	38
Imagen 25. Función de coherencia	39
Imagen 26. Función de respuesta en frecuencia del ensayo modal resultante.....	41
Imagen 27. Modo vibración 1 a 964,5 Hz.....	41
Imagen 28. Modo vibración 1 a 991,9 Hz.....	42
Imagen 29. Modo vibración 1 a 1879 Hz.....	42
Imagen 30. Modo vibración 1 a 1170,3 Hz.....	43
Imagen 31. Modo vibración 2 a 1184 Hz.....	43
Imagen 32. Modo 3 vibración a 2211,9 Hz.....	44
Imagen 33. Esquema general de los parámetros de salida deseados.	48
Imagen 34. Captura en continuo del ruido señal en precarga 1000 medidas duración 1 sg.....	51
Imagen 35. Función rápida de Fourier	52
Imagen 36. Entrada sensor capacitivo para Montecarlo	55
Imagen 37. Salida Montecarlo eje X, media -0.4095mm, desviación 2.256	55
Imagen 38. Salida eje Y, media 196.2mm, desviación 3.0481	55
Imagen 39. Salida Montecarlo eje Z, media 410.912mm, desviación 2.5678.....	56
Imagen 40. Salida Montecarlo giro en X, media 0.0319°, desviación 0.1584	56
Imagen 41. Salida Montecarlo giro en Y, media 0.1166°, desviación 0.1229	56
Imagen 42. Salida Montecarlo giro en Z, media 59.877°, desviación 1.0088	56
Imagen 43. Conjunto plataforma+brazo articulado.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Número de modos, frecuencias y desfases resultantes del análisis modal de campo .	40
Tabla 2. Resultados modales de ensayo modal realizado por elementos finitos plataforma superior	43
Tabla 3. Medidas de ruido por captación en continuo 1000 medidas por segundo	53
Tabla 4. Medidas nominales sensores capacitivos y errores de banda en posición 1, para simulación de Montecarlo.....	54
Tabla 5. Medias, desviaciones estándar e intervalos de confianza del 95% de la matriz (X Y Z α β γ).....	56

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Ejemplo ilustrativo de picos de resonancia	39
Gráfico 2. Ejemplo ilustrativo de picos de anti-resonancia.....	39
Gráfico 3. Ejemplo ilustrativo desfase 180º-180º entre resonancias y anti-resonancias	40
Gráfico 4. Sensibilidad del sensor	49
Gráfico 5. Offset en salida del sensor.....	50
Gráfico 6. Error de linealidad del sensor	50
Gráfico 7. Distribución del error de medida del sensor capacitivo.....	51
Gráfico 8. Un ciclo de señal compuesta por principales armónicos de Fourier.....	52
Gráfico 9. Ruido de medida de los sensores sometidos a precarga de 4 Bar de la estructura...	53

ANEXOS

Anexo I. Comandos utilizados en MATLAB para la obtención de MONTECARLO

% Montecarlo para obtención de distribución de medida de sensor

% n= número de casos, d= medida del sensor, e= rango de error del sensor, mu= media normal ruido, dst=desviación ruido

L1=linspace(d1,d1,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L1=transpose(L1);

L2=linspace(d2,d2,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L2=transpose(L2);

L3=linspace(d3,d3,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L3=transpose(L3);

L4=linspace(d4,d4,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L4=transpose(L4);

L5=linspace(d5,d5,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L5=transpose(L5);

L6=linspace(d6,d6,n); % matriz de medida para generación de Montecarlo
L6=transpose(L6);

*x1_1=-e1*d1+(2*e1*d1.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 1*
*x2_1= 0 + dst1.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 1*
y1=L1+x1_1+x2_1; % Función modelo, medida y errores
y_m1=mean(y1); % media de la medida
y_s1=std(y1); % desviación de la medida
y1=sort(y1); % ordenación del vector

*x1_2=-e2*d2+(2*e2*d2.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 2*
*x2_2= 0 + dst2.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 2*
y2=L2+x1_2+x2_2; % función modelo, medida y errores
y_m2=mean(y2); % media de la medida
y_s2=std(y2); % desviación de la medida
y2=sort(y2); % ordenación del vector

*x1_3=-e3*d3+(2*e3*d3.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 3*
*x2_3= 0 + dst3.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 3*
y3=L3+x1_3+x2_3; % Función modelo, medida y errores
y_m3=mean(y3); % media de la medida
y_s3=std(y3); % desviación de la medida
y3=sort(y3); % ordenación del vector

```

x1_4=-e4*d4+(2*e4*d4.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 4
x2_4= 0 + dst4.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 4
y4=L4+x1_4+x2_4; % Función modelo, medida y errores
y_m4=mean(y4); % media de la medida
y_s4=std(y4); % desviación de la medida
y4=sort(y4); % ordenación del vector

x1_5=-e5*d5+(2*e5*d5.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 5
x2_5= 0 + dst5.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 5
y5=L5+x1_5+x2_5; % Función modelo, medida y errores
y_m5=mean(y5); % media de la medida
y_s5=std(y5); % desviación de la medida
y5=sort(y5); % ordenación del vector

x1_6=-e6*d6+(2*e6*d6.*rand(n,1)); % error medida, comportamiento uniforme sensor 6
x2_6= 0 + dst6.*randn(n,1); % influencia ruido medida, comportamiento normal sensor 6
y6=L6+x1_6+x2_6; % Función modelo, medida y errores
y_m6=mean(y6); % media de la medida
y_s6=std(y6); % desviación de la medida
y6=sort(y6); % ordenación del vector

for i=1:n
sensor_reading_act=[y1(i);y2(i);y3(i);y4(i);y5(i);y6(i)]; % llamada función global
mat(i,:)= MatrizCambio(Posplat, sensor_reading_act, M2pos1, X2pos1, M2pos2,...
    X2pos2, M2pos3, X2pos3, M2pos4, X2pos4, M2pos5, X2pos5,...
    M2pos6, X2pos6, M1, M2, M3, M4, M5, M6, X_op,...
    Sensor_Reading_M1, Sensor_Reading_M2, Sensor_Reading_M3,...
    Sensor_Reading_M4, Sensor_Reading_M5, Sensor_Reading_M6)

end

x=mat(:,1);
w=mat(:,2);
z=mat(:,3);
A=mat(:,4);
B=mat(:,5);
C=mat(:,6);

```

Anexo II. Cálculo de Fourier mediante MATLAB

```
Fs = 1000; % Numero de captaciones de muestra
T = 1/Fs; % Tiempo de muestra
L = 1000; % Longitud de señal
t = (0:L-1)*T; % Vector tiempo
z = y; % senoide de ruido
plot(Fs*t(1:1000),y(1:1000)) % visualización del ruido de medida
xlabel('time (milliseconds)')
plot(Fs*t(1:1000),y(1:1000))
Y = fft(y)/L; %Función rápida de Fourier
f = Fs/2*linspace(0,1,length(Y)); % muestra en pantalla Función frecuencias y amplitud
plot(f,2*abs(Y))
```

